



Simulasi Analisa Aliran Daya Pekerjaan Evakuasi Daya Penyulang Kintamani di PT PLN (Persero) UP3 Bali Timur dengan Software ETAP

Putu Eka Utama Putra^{1*}, I Wayan Sukadana²

¹⁻² Fakultas Teknik Dan Informatika, Universitas Pendidikan Nasional, Indonesia

*Penulis Korespondensi: katamaputra@gmail.com

Abstract. *This study aims to analyze the technical and economic impact of power evacuation work on the 20 kV distribution system at PT PLN (Persero) UP3 East Bali. The main problem studied is the high losses and poor voltage profile on the downstream side of the Kintamani feeder. The method used is load flow simulation using ETAP software with a comparative approach to conditions before and after power evacuation. The results showed that the active losses decreased from 1.017 MW to 0.626 MW (efficiency 38.45%), accompanied by an increase in the end voltage from 16.32 kV to 18.72 kV and 19.38 kV, thus meeting the SPLN 1:1995 standard. The reduction in losses resulted in energy savings of 3,425,160 kWh/year. From the economic side, a payback period (PBP) of 1.40 years was obtained, which shows that the project is financially feasible. In addition, the improvement of network performance also contributes to the reliability of the distribution system and the continuity of the distribution of electrical energy to customers. Thus, power evacuation work has been proven to be effective in improving power distribution efficiency, improving voltage quality, and providing significant economic benefits.*

Keywords: ETAP; Losses; Payback Period; Power Evacuation; Voltage Profile.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan menganalisis dampak teknis dan ekonomis pekerjaan evakuasi daya pada sistem distribusi 20 kV di PT PLN (Persero) UP3 Bali Timur. Permasalahan utama yang dikaji adalah tingginya losses dan buruknya profil tegangan pada sisi hilir penyulang Kintamani. Metode yang digunakan adalah simulasi load flow menggunakan software ETAP dengan pendekatan perbandingan kondisi sebelum dan sesudah evakuasi daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa losses aktif menurun dari 1,017 MW menjadi 0,626 MW (efisiensi 38,45%), disertai peningkatan tegangan ujung dari 16,32 kV menjadi 18,72 kV dan 19,38 kV, sehingga memenuhi standar SPLN 1:1995. Penurunan losses tersebut menghasilkan saving energi sebesar 3.425.160 kWh/tahun. Dari sisi ekonomi, diperoleh payback period (PBP) sebesar 1,40 tahun, yang menunjukkan proyek layak secara finansial. Selain itu, peningkatan performa jaringan juga berkontribusi pada keandalan sistem distribusi dan kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan. Dengan demikian, pekerjaan evakuasi daya terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi penyaluran daya, memperbaiki mutu tegangan, serta memberikan manfaat ekonomi yang signifikan.

Kata Kunci: ETAP; evakuasi daya; Kerugian; Periode Pengembalian; Profil Tegangan.

1. PENDAHULUAN

Penyediaan listrik yang stabil dan berkualitas sangat penting dalam menunjang keberlangsungan kegiatan ekonomi, industri, serta kehidupan sehari-hari. Salah satu aspek yang mempengaruhi kualitas penyediaan listrik adalah kualitas tegangan yang disalurkan melalui jaringan distribusi listrik. Kualitas tegangan yang buruk dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik, gangguan operasional, dan penurunan efisiensi sistem distribusi. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa sistem distribusi listrik mampu menyediakan tegangan yang stabil dan sesuai dengan standar (Hasanah, Koerniawan, & Yuliansyah, 2019)

Di Bali, wilayah Kintamani merupakan salah satu daerah yang mengalami peningkatan kebutuhan listrik seiring dengan berkembangnya sektor pariwisata dan infrastruktur lainnya. Untuk memenuhi kebutuhan daya yang semakin meningkat, dibutuhkan perbaikan dan pengembangan jaringan distribusi listrik yang ada ditambah lagi beroperasinya Gardu Induk

Kubu di Karangasem, membuka peluang bagi PT PLN UP3 Bali Timur untuk membuat penyulang baru yang akan dibangun sepanjang 16,3 kms. Salah satu alternatif solusi untuk meningkatkan kapasitas distribusi daya adalah dengan melakukan pekerjaan evakuasi daya dari Penyulang Kintamani Line Penelohan ke Penyulang Kayu Selem. Langkah ini diharapkan dapat meningkatkan kapasitas distribusi dan meratakan distribusi daya ke wilayah yang lebih luas serta memperbaiki drop tegangan yang ada di beberapa daerah seperti Songan, Kayu Selem, Penelohan dan Bukit Payang.

Namun, pekerjaan evakuasi daya ini perlu dianalisis dari berbagai aspek, termasuk dampak finansial dan kualitas tegangan yang dihasilkan. Perubahan konfigurasi jaringan distribusi dapat mempengaruhi distribusi tegangan di sepanjang sistem, yang pada gilirannya mempengaruhi kinerja peralatan listrik dan stabilitas sistem secara keseluruhan. Selain itu, perubahan tersebut juga berpotensi menambah biaya operasional dan mempengaruhi efisiensi biaya sistem distribusi. Dulu PT. PLN (Persero) dalam pembuatan Dokumen Kajian Kelayakan Proyek dan permintaan anggaran ke pusat masih menggunakan data berdasarkan RAB yang ada lalu dipilih berdasarkan anggaran yang ada. Namun, seiring berkembangnya jaman dalam menetapkan skala prioritas pekerjaan/proyek di PLN maka digunakanlah software ETAP sebagai salah satu support dalam menentukan proyek-proyek mana saja yang memberi impact/dampak secara teknis maupun finansial di PLN.

Untuk menganalisis dampak dari pekerjaan evakuasi daya ini, penggunaan software simulasi seperti ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) dapat memberikan gambaran yang jelas tentang dampak finansial dan kualitas tegangan. ETAP adalah perangkat lunak yang dirancang untuk menganalisis sistem kelistrikan dengan kemampuan untuk memodelkan aliran daya, kualitas tegangan, dan kerugian daya dalam suatu sistem distribusi (Kisworo, Utomo, Saputra, & Stefanie, 2025). Dengan menggunakan software ini, analisis dampak finansial dan kualitas tegangan akibat perubahan jaringan distribusi dapat dilakukan secara akurat dan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai rupiah yang terselamatkan dan mensimulasikan perbaikan losses serta kualitas tegangan akibat pekerjaan evakuasi daya dari Penyulang Kintamani Line Penelohan menuju penyulang Kayu Selem dengan menggunakan software ETAP. Diharapkan hasil analisis ini dapat memberikan informasi yang berguna bagi pengelola sistem distribusi untuk meningkatkan kualitas pasokan listrik, efisiensi operasional, serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam perencanaan dan pengelolaan sistem kelistrikan di Bali.

2. KAJIAN PUSTAKA

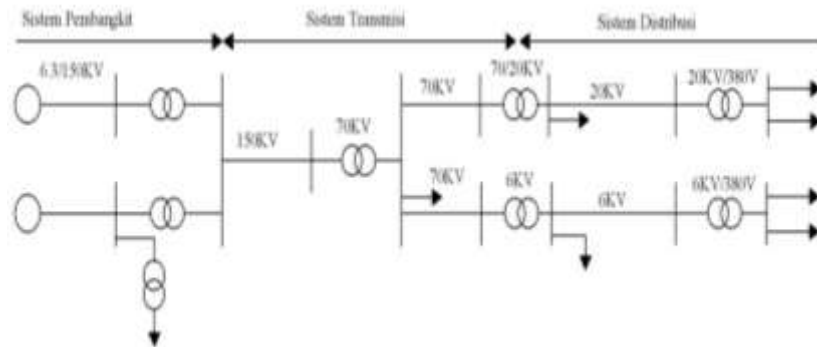
Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sistem terpadu yang berfungsi menghasilkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan energi listrik dari pembangkit hingga konsumen. Sistem ini terdiri dari tiga komponen utama, yaitu pembangkit (*generation*), transmisi (*transmission*), dan distribusi (*distribution*), yang saling terhubung membentuk sistem yang andal dan efisien (Gönen, 2014). Pada tahap pembangkit, energi primer dikonversi menjadi energi listrik melalui generator sinkron dengan tegangan keluaran umumnya 6,6 kV hingga 24 kV. Tegangan ini kemudian dinaikkan menggunakan transformator daya untuk meminimalkan rugi-rugi saat transmisi jarak jauh (Kundur & Malik, 2022). Tahap transmisi berfungsi menyalurkan daya melalui jaringan tegangan tinggi (70 kV–500 kV) dengan mempertimbangkan efisiensi dan stabilitas sistem, serta dilengkapi perangkat proteksi seperti *circuit breaker*, relai, dan sistem SCADA (PT PLN (Persero), 2010; Wood & Wollenberg, 1996).

Selanjutnya, tahap distribusi menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke konsumen melalui jaringan tegangan menengah (20 kV) dan tegangan rendah (220/380 V), sekaligus menjaga kualitas tegangan sesuai standar yang berlaku (Sahbana & Suheta, 2021; Suhadi, 2008). Ketiga komponen ini membentuk suatu grid sistem tenaga listrik yang kinerjanya bergantung pada keseimbangan daya dan keandalan sistem. Dalam perencanaannya, analisis aliran daya (*load flow analysis*) digunakan untuk mengevaluasi profil tegangan, rugi daya, dan kondisi operasi sistem (Saadat, 1999). Seiring perkembangan teknologi, sistem tenaga listrik telah bertransformasi menuju *smart grid* yang mengintegrasikan teknologi digital dan sistem kontrol untuk meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, serta mendukung integrasi energi terbarukan (Abdi, 2024; Cavus, 2024).

Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Suhadi (2008) menyatakan bahwa sistem distribusi merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik yang berguna untuk menyalurkan tenaga listrik yang dimulai dari gardu induk sampai ke konsumen.



Gambar 1. Diagram Garis Tunggal Sistem Distribusi Tenaga Listrik.

Sumber: (Kadir, 2000)

Secara umum, sistem penyaluran tenaga listrik atau sistem distribusi tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu sistem distribusi primer dan sistem ditribusi sekunder. Sistem distribusi primer Merupakan bagian sistem penyaluran atau distribusi yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk menuju gardu distribusi. Jaringan primer ini biasanya disebut jaringan tegangan menengah karena tegangan kerja yang diberikan pada salurannya adalah tegangan kerja 20 kV. Konstruksi dan struktur jaringan yang digunakan dalam sistem distribusi merupakan kompromi antara kepentingan teknis di satu pihak dan alasan ekonomis di lain pihak. Secara teknis, konstruksi dan struktur jaringan yang digunakan harus memenuhi syarat keandalan minimum jaringan, disisi lain biaya minimum yang dipilih hams dipenuhi juga.

Distribusi sekunder mempergunakan tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan distribusi primer, terdapat pula pertimbangan-pertimbangan perihal kehandalan pelayanan dan regulasi tegangan. Sistem sekunder dapat terdiri atas empat jenis yakni pelayanan dengan transformator sendiri, pelayanan satu transformator dengan sejumlah pemakai, dan bangking sekunder (Kadir, 2000).

Kualitas Tegangan dalam Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Kualitas tegangan adalah suatu indikator dari seberapa baik tegangan yang disalurkan kepada konsumen tetap stabil dan sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh penyedia listrik. Kualitas tegangan yang buruk dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik dan menurunkan efisiensi operasional sistem distribusi (Nugroho, Mustaqim, & Sandria Jaya Wardhana, 2025). Beberapa gangguan kualitas tegangan yang umum terjadi antara lain:

Fluktuasi Tegangan

Merupakan perubahan tegangan secara tiba-tiba yang dapat menyebabkan peralatan listrik bekerja tidak optimal. Fluktuasi ini bisa terjadi karena perubahan beban yang besar atau gangguan pada sistem distribusi (Junito, Putra, Yani, & Nofiansah, 2025).

Harmoni

Adalah distorsi gelombang tegangan yang terjadi akibat penggunaan peralatan listrik seperti motor induksi atau peralatan elektronik yang menghasilkan gelombang tidak murni. Distorsi ini dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada peralatan dan merusak sistem (Panggabean, Surapati, & Rosa, 2022).

Kelebihan Beban (Overload)

Adalah ketika beban yang terhubung melebihi kapasitas sistem distribusi, terjadi penurunan tegangan dan meningkatkan risiko kerusakan pada perangkat distribusi dan konsumen (Putra, Riswanto, & Komaini, 2021).

Drop Tegangan

Jatuh tegangan adalah berkurangnya nilai tegangan listrik ketika energi disalurkan melalui penghantar dari sumber ke beban. Secara umum, besar jatuh tegangan dipengaruhi oleh panjang saluran dan besarnya beban yang dilayani. Semakin panjang saluran dan semakin besar arus yang mengalir, maka jatuh tegangannya cenderung semakin besar.

Software ETAP

ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) adalah perangkat lunak yang banyak digunakan untuk analisis dan perancangan sistem kelistrikan. Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk melakukan simulasi aliran daya, mengevaluasi kualitas tegangan, serta menghitung kerugian daya pada sistem distribusi (Ramadhan, 2023). ETAP dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan analisis sistem tenaga listrik modern dengan menyediakan model komputer yang menggambarkan kondisi sistem kelistrikan yang sebenarnya. Dengan model tersebut, pengguna dapat melakukan berbagai analisis dan simulasi tanpa harus melakukan percobaan langsung pada sistem yang sedang beroperasi, sehingga risiko gangguan pada sistem nyata dapat dihindari (Pan et al., 2020). Dalam proses perhitungannya, ETAP menggunakan metode perhitungan matematika untuk menyelesaikan persoalan aliran daya pada jaringan yang kompleks. Metode yang umum digunakan dalam ETAP untuk analisis aliran daya adalah metode Newton-Raphson dan Gauss-Seidel, yang bekerja melalui perhitungan berulang sampai

diperoleh hasil yang stabil, seperti nilai tegangan pada setiap titik jaringan dan besarnya rugi-rugi daya pada saluran (Abdi, 2024).

Komponen Detail Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Penghantar merupakan komponen vital dalam sistem distribusi yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari sumber ke beban. Menurut Wasahua et al., (2023) menunjukkan bahwa material penghantar umumnya meliputi tembaga, aluminium, dan kombinasi aluminium-baja seperti ACSR, serta varian lain seperti AAC dan AAAC yang dipakai sesuai kebutuhan aplikasi, tegangan, dan biaya.

- 1) Penghantar Tembaga (*Copper Conductor*) Material tembaga memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik dengan resistivitas sekitar $1,72 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ pada suhu 20°C .
- 2) Penghantar Aluminium (*Aluminum Conductor*) Penghantar aluminium memiliki resistivitas yang lebih tinggi dibandingkan tembaga yaitu sekitar $2,82 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, namun memiliki keunggulan dalam hal berat yang lebih ringan dan biaya yang lebih ekonomis (Yansuri, Subianto, & Akbar, 2021).
- 3) Penghantar ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) Jenis penghantar ini menggunakan kombinasi aluminium sebagai konduktor dan baja sebagai penguat mekanis.

Kilowatt-hour meter merupakan instrumen pengukuran energi listrik yang dikonsumsi konsumen dalam periode tertentu. Teknologi modern menggunakan *electronic meter* dengan prinsip kerja berbasis *current transformer* (CT) dan *potential transformer* (PT) untuk mengukur parameter listrik (Manembu, Kewo, & Singgeta, 2021). Prinsip Pengukuran Energi Listrik yang dikonsumsi dihitung menggunakan persamaan:

$$E = P \times V \times I \times \cos \varphi$$

dimana:

E = energi listrik (kWh)

P= daya (W)

V = tegangan (V)

I= arus (A)

$\cos \varphi$ = faktor daya

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja sistem distribusi tenaga listrik antara lain:

1) Topografi dan Jarak:

Jarak antara sumber pembangkit dan konsumen dapat mempengaruhi kualitas tegangan. Semakin jauh jarak, semakin besar kerugian daya yang terjadi (Ihsan, Erhaneli, & Anthony, 2023).

2) Perubahan Beban

Fluktuasi beban yang besar dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam sistem distribusi, mempengaruhi kualitas tegangan, dan meningkatkan kerugian daya (Yusiran & Hasanudin, 2025).

3) Kondisi Peralatan:

Kondisi dan pemeliharaan peralatan distribusi, seperti transformator dan penyulang, sangat mempengaruhi kinerja sistem distribusi. Peralatan yang rusak atau tidak terawat dengan baik dapat menyebabkan gangguan atau penurunan kualitas tegangan (Mugandi, 2022).

4) Cuaca dan Lingkungan

Kondisi cuaca ekstrem, seperti hujan lebat atau petir, dapat merusak infrastruktur distribusi dan mengganggu kelancaran distribusi listrik. Di daerah yang rentan terhadap bencana alam, seperti banjir atau gempa bumi, infrastruktur distribusi perlu dirancang dengan mempertimbangkan faktor-faktor ini (Khoirunnisa, Inayah, Wiherdiansyah, Adyano, & Aribowo, 2024).

5) Teori Kerugian Daya (*Power Losses*)

Kerugian daya dalam sistem distribusi terjadi akibat resistansi penghantar dan dapat diklasifikasikan menjadi kerugian teknis dan non-teknis. Menurut (Syaputra & Ervianto, 2017).

Pekerjaan Evakuasi Daya dalam Sistem PLN

Pekerjaan evakuasi daya adalah proses pemindahan beban listrik dari satu penyulang ke penyulang lain untuk mengoptimalkan kinerja sistem distribusi. Menurut Rahmaan et al., (2016), pekerjaan evakuasi daya bertujuan untuk mengatasi kondisi:

Overloading: Ketika beban melebihi kapasitas penyulang

Pemeliharaan: Pemindahan beban saat penyulang dalam kondisi maintenance

Tahapan pekerjaan evakuasi daya sesuai Standard Operating Procedure (SOP) PLN meliputi (Muhtar, Iwan, Antarissubhi, & Suryani, 2022):

1) Analisis Kondisi Awal: Evaluasi *loading* dan kualitas tegangan

- 2) Simulasi Evakuasi: Menggunakan software seperti ETAP untuk prediksi dampak
- 3) Eksekusi *Switching*: Pelaksanaan manuver switching sesuai prosedur
- 4) Monitoring Pasca-Evakuasi: Pemantauan parameter system

Saving kWh dan Evaluasi Ekonomis

Energy saving atau penghematan energi merupakan pengurangan konsumsi energi listrik yang dicapai melalui peningkatan efisiensi sistem. Dalam konteks sistem distribusi, penghematan energi dapat direalisasikan melalui pengurangan kerugian jaringan (Marisa & Humena, 2025).

Perhitungan *Saving Energi* :

$$\text{Energy saving} = \Delta P_{\text{loss}} \times T \times \text{LF} \dots (2.16)$$

dimana:

Energy saving = penghematan energi (kWh/tahun)

ΔP_{loss} = pengurangan kerugian daya (kW)

T = waktu operasi tahunan (8760 jam)

LF = faktor beban rata-rata

Evaluasi ekonomis dilakukan untuk mengetahui nilai finansial dari penghematan energi listrik yang diperoleh akibat penurunan rugi-rugi daya (*losses*) pada sistem distribusi setelah dilakukan pekerjaan evakuasi daya. Menurut Gönen (2014), pengurangan kerugian daya pada jaringan distribusi merupakan salah satu strategi utama dalam meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik, karena setiap penurunan losses secara langsung berkontribusi terhadap penghematan energi dan biaya operasional. Kadir (2000) juga menyatakan bahwa evaluasi ekonomis pada sistem distribusi tenaga listrik dapat dilakukan dengan mengonversi besarnya energi yang berhasil dihemat menjadi nilai rupiah berdasarkan tarif energi listrik yang berlaku.. Secara matematis, nilai ekonomis penghematan energi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Nilai Ekonomis} = \text{Energy saving} \times \text{Unit cost} \dots (2.17)$$

dimana Unit cost adalah tarif energi listrik (Rp/kWh).

Analisis Investasi dan *Payback Period* (PBP)

Menurut Blank & Tarquin (2014), analisis investasi diperlukan untuk membandingkan biaya yang dikeluarkan dengan manfaat yang diperoleh selama masa operasi proyek sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan teknik yang tepat. Salah satu metode yang paling umum digunakan dalam analisis kelayakan investasi di bidang teknik adalah metode *Payback Period* (PBP). Metode ini digunakan untuk menentukan jangka waktu yang dibutuhkan agar total manfaat atau penghematan yang dihasilkan oleh suatu proyek dapat menutup kembali biaya investasi awal yang telah dikeluarkan. Blank & Tarquin (2014) menyatakan bahwa

payback period merupakan metode evaluasi investasi yang sederhana dan banyak digunakan karena kemudahannya dalam memberikan gambaran awal mengenai tingkat risiko dan kecepatan pengembalian investasi suatu proyek.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode pendekatan simulasi komputasi dengan software ETAP. Pendekatan ini dipilih karena mampu menyediakan analisis yang komprehensif tanpa perlu melakukan pengujian langsung pada sistem tenaga listrik yang beroperasi, sehingga mengurangi risiko gangguan operasional. Studi aliran daya digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasi sistem tenaga listrik dalam keadaan normal dan untuk merencanakan pekerjaan sistem di masa mendatang. Data primer merupakan data yang diperoleh secara langsung melalui observasi, wawancara, dan pengukuran. Dalam penelitian ini, data primer meliputi hasil diskusi dan wawancara dengan teknisi atau tim perencana di PLN, serta data teknis aset seperti panjang dan penampang konduktor, kapasitas dan beban trafo, serta material distribusi yang diperoleh dari survei perencanaan. Data sekunder adalah data yang diperoleh secara tidak langsung dari berbagai sumber terpercaya. Dalam penelitian ini, data sekunder mencakup dokumen SPLN, buku standar konstruksi, laporan data aset PLN, serta literatur dan referensi terkait penggunaan perangkat lunak ETAP.

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan simulasi menggunakan ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) untuk analisis aliran daya (*load flow analysis*), sehingga data yang dikumpulkan berupa parameter sistem tenaga sebagai input model. Pengumpulan data meliputi studi dokumen teknis seperti datasheet pabrikan, nameplate peralatan, single line diagram, dan laporan operasi untuk memastikan kesesuaian parameter (impedansi, rating MVA, tegangan nominal, dan kapasitas beban); observasi lapangan melalui survei untuk memperoleh data jumlah tiang, panjang dan jenis konduktor, penampang konduktor, serta kapasitas dan beban trafo distribusi; serta studi literatur dari jurnal ilmiah, manual ETAP, Buku Standar Konstruksi PLN, dan SPLN sebagai acuan standar dan asumsi teknis guna melengkapi keterbatasan data aktual.

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi kondisi *steady state* melalui *load flow analysis*. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi operasi sistem distribusi tenaga listrik pada keadaan normal tanpa mempertimbangkan perubahan transien. Penghitungan *saving* energi listrik dilakukan untuk mengetahui besarnya penghematan energi yang diperoleh setelah dilakukan perbaikan atau optimasi pada sistem distribusi tenaga listrik. Penghematan energi ini terutama berasal dari penurunan rugi-rugi daya

(*losses*) pada jaringan, baik pada sisi penghantar maupun peralatan distribusi lainnya. Rugi-rugi energi listrik dinyatakan dalam satuan kilowatt-hour (kWh) dan bergantung pada besarnya rugi daya yang terjadi serta lamanya waktu operasi sistem. Oleh karena itu, selisih rugi energi antara kondisi sebelum dan sesudah perbaikan perlu dihitung terlebih dahulu sebagai dasar untuk menentukan besarnya *saving* energi.

Menghitung *saving* kWh yang diperoleh oleh PLN dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta \text{ Loss kwh} = (\text{Loss kWh setelah} - \text{Loss kWh sebelum}) \times T$$

$$\text{Saving kwh} = \Delta \text{ Loss kWh} \times \text{Rp/kwh} \times \text{LF (load factor)}$$

Efisiensi dalam proyek pekerjaan evakuasi daya dihitung untuk mengetahui sejauh mana kegiatan ini mampu mengurangi rugi-rugi daya (*losses*) pada jaringan distribusi. Menurut Kadir (2000), efisiensi sistem distribusi dapat ditinjau dari besarnya rugi daya yang berhasil ditekan setelah dilakukan perubahan konfigurasi atau perbaikan jaringan. Semakin besar pengurangan rugi daya, semakin tinggi pula efisiensi yang diperoleh. Hal ini sejalan dengan Gönen (2014) yang menegaskan bahwa evaluasi efisiensi distribusi listrik umumnya dilakukan dengan membandingkan kondisi rugi daya sebelum dan sesudah tindakan teknis tertentu. Perhitungan efisiensi proyek pekerjaan evakuasi daya dalam penelitian ini diformulasikan sebagai berikut:

$$\eta_{\text{evakuasi}} = \frac{P_{\text{loss sebelum}} - P_{\text{loss setelah}}}{P_{\text{loss sebelum}}}$$

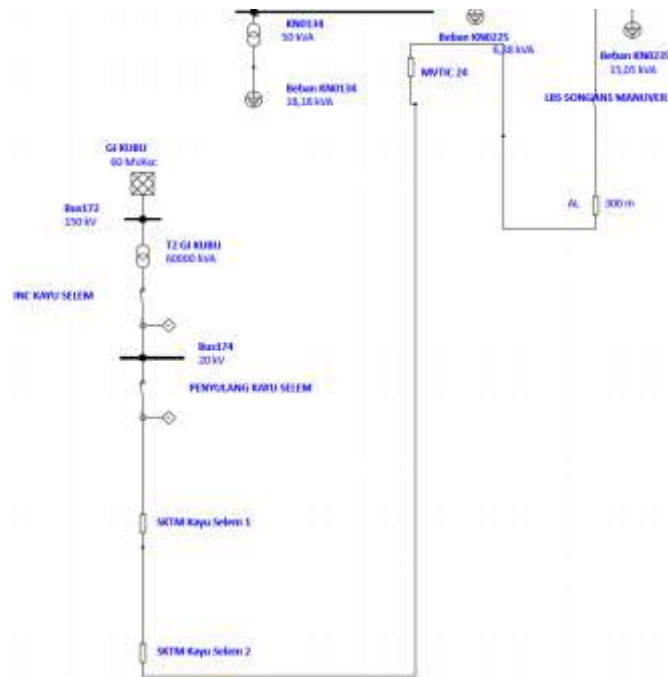
Dimana:

$P_{\text{loss sebelum}}$ = total rugi daya sebelum dilakukan pekerjaan evakuasi daya (kW),

$P_{\text{loss sesudah}}$ = total rugi daya setelah dilakukan pekerjaan evakuasi daya (kW),

η evakuasi = efisiensi proyek pekerjaan evakuasi daya (%).

Analisis perbandingan hasil dengan standar kinerja jaringan distribusi dilakukan setelah diperoleh nilai efisiensi (%) dan *rupiah saving* dari hasil simulasi aliran daya. Nilai efisiensi yang didapat tidak hanya digunakan sebagai angka deskriptif, tetapi dibandingkan dengan standar efisiensi sistem distribusi tenaga listrik yang telah ditetapkan dalam literatur teknis. Menurut Gönen (2014), efisiensi jaringan distribusi tenaga listrik yang baik berada pada kisaran 85%–95% dengan rugi daya 5%–15%. Sistem yang sangat efisien dapat mencapai lebih dari 95%, sedangkan sistem lama atau daerah pedesaan umumnya hanya 80%–90%. Sementara itu, Kadir (2000) menyatakan bahwa kerugian daya yang wajar dalam sistem distribusi tenaga listrik di Indonesia tidak boleh melebihi 10%, dan PLN menargetkan *losses* teknis maksimum 8% untuk jaringan tegangan menengah. Berdasarkan standar tersebut:



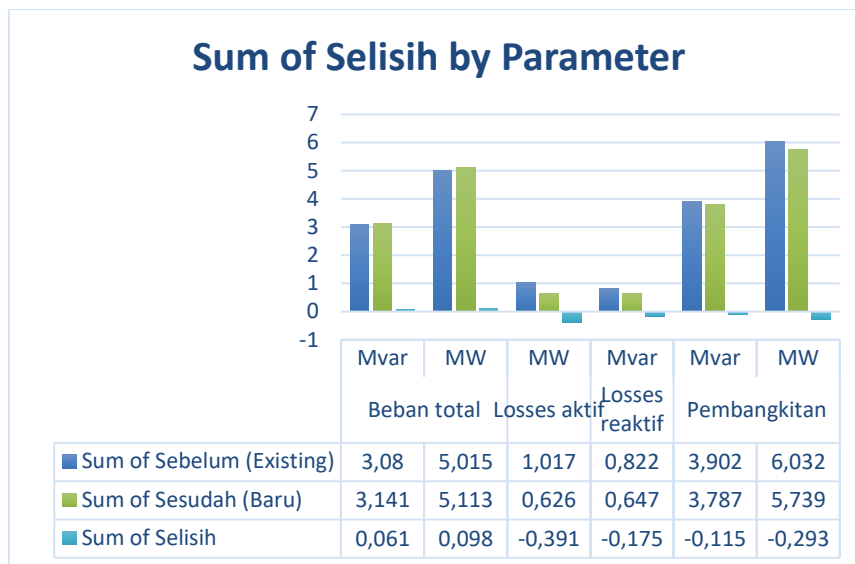
Gambar 3. SLD ETAP Penyulang Kayu Selem.

Simulasi aliran daya pada penelitian ini dilakukan menggunakan ETAP dengan dua skenario tahun 2025, yaitu kondisi eksisting (sebelum evakuasi daya) dan kondisi baru (sesudah evakuasi daya), dengan pengaturan yang sama (*Data Revision: Base, Configuration: Normal, Loading Category: 2025, Generation Category: Design, dan Diversity Factor: Normal Loading*) untuk memastikan perbandingan hasil merepresentasikan perubahan konfigurasi jaringan. Secara pemodelan, skenario eksisting terdiri dari 578 bus dan 575 branch, sedangkan skenario baru 581 bus dan 578 branch, yang mencerminkan adanya perubahan struktur jaringan, sementara jumlah beban tetap 211 dan tanpa generator lokal (disuplai oleh 2 grid). Hasil simulasi menunjukkan peningkatan beban aktif dari 5,015 MW menjadi 5,113 MW dan beban reaktif dari 3,08 Mvar menjadi 3,141 Mvar, disertai penurunan rugi daya aktif dari 1,017 MW menjadi 0,626 MW dan rugi daya reaktif dari 0,822 Mvar menjadi 0,647 Mvar, dengan nilai mismatch yang sangat kecil pada kedua skenario sehingga hasil load flow dinilai valid untuk analisis perbandingan.

Tabel 1. Ringkasan Study Case Load Flow ETAP (Tahun 2025).

Study ID	SEBELUM	SESUDAH
Study Case ID	Tahun 2025	Tahun 2025
Data Revision	Base	Base
Configuration	Normal	Normal
Loading Cat	2025	2025
Generation Cat	Design	Design
Diversity Factor	Normal Loading	Normal Loading
Buses	578	581
Branches	575	578
Generators	0	0
Power Grids	3	3
Loads	211	211
Load-MW	5,015	5,113
Load-Mvar	3,08	3,141
Generation-MW	6,032	5,739
Generation-Mvar	3,902	3,787
Loss-MW	1,017	0,626
Loss-Mvar	0,822	0,647
Mismatch-MW	0,0005	0,0001
Mismatch-Mvar	0,0002	0

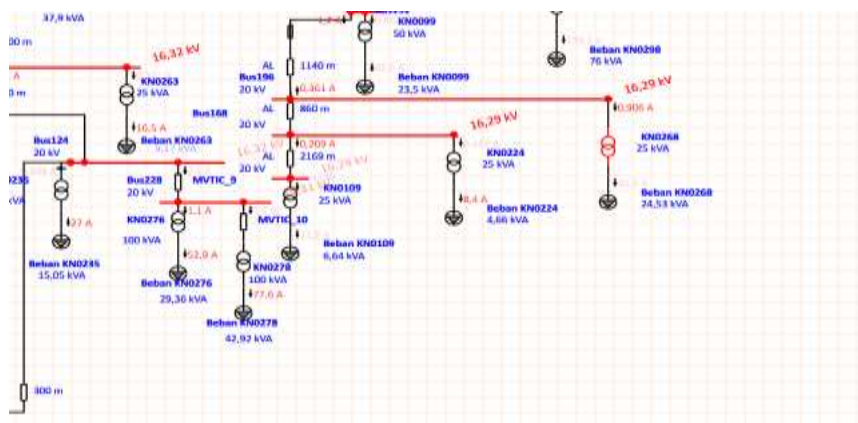
Simulasi steady state (*load flow*) menggunakan ETAP dilakukan untuk memperoleh gambaran kuantitatif kondisi operasi jaringan pada dua skenario, yaitu kondisi eksisting (sebelum evakuasi daya) dan kondisi baru (sesudah evakuasi daya). Output utama yang dianalisis pada tahap ini mencakup total beban aktif dan reaktif, total pembangkitan, serta rugi-rugi daya aktif dan reaktif sistem. Ringkasan parameter tersebut digunakan sebagai dasar perbandingan kinerja jaringan antar-skenario, sehingga dapat ditentukan perubahan losses sebagai indikator efisiensi penyaluran daya pada konfigurasi sesudah evakuasi.



Gambar 4. Ringkasan Hasil Simulasi Load Flow ETAP pada Kondisi Eksisting dan Sesudah Evakuasi Daya.

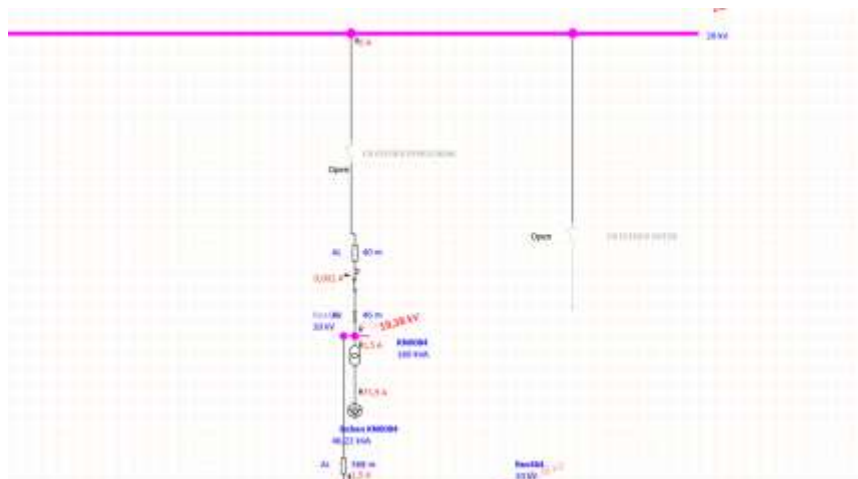
Berdasarkan Gambar 4, penerapan evakuasi daya menunjukkan penurunan signifikan pada rugi-rugi daya sistem, dimana losses aktif turun dari 1,017 MW menjadi 0,626 MW (berkurang 0,391 MW), yang mengindikasikan peningkatan efisiensi akibat berkurangnya rugi-rugi I²R setelah perubahan konfigurasi jaringan. Penurunan ini terjadi meskipun total beban relatif meningkat tipis, dari 5,015 MW menjadi 5,113 MW dan beban reaktif dari 3,080 Mvar menjadi 3,141 Mvar, sehingga dapat disimpulkan bahwa perbaikan efisiensi lebih dipengaruhi oleh perubahan pola aliran daya dan distribusi arus, bukan oleh penurunan beban. Hal serupa juga terlihat pada losses reaktif yang menurun dari 0,822 Mvar menjadi 0,647 Mvar, yang menunjukkan kondisi sistem yang lebih baik dalam hal kebutuhan daya reaktif dan stabilitas tegangan. Sementara itu, pembangkitan aktif mengalami penyesuaian dari 6,032 MW menjadi 5,739 MW mengikuti kondisi operasi sistem, namun indikator utama keberhasilan tetap ditunjukkan oleh penurunan losses dan perbaikan kinerja jaringan secara keseluruhan.

Analisis drop tegangan sebelum dan sesudah evakuasi daya dipahami sebagai selisih tegangan antara sisi hulu (Gardu Induk) dan sisi hilir (ujung penyulang) yang muncul karena karakteristik impedansi saluran dan besarnya arus beban yang mengalir sepanjang jaringan. Oleh karena itu, penilaian difokuskan pada dua titik pengamatan tersebut, yaitu tegangan di GI dan tegangan ujung penyulang, untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat jatuh tegangan pada kondisi eksisting serta perbaikannya pada kondisi sesudah evakuasi.



Gambar 5. Tegangan ujung sebelum evakuasi daya (ETAP).

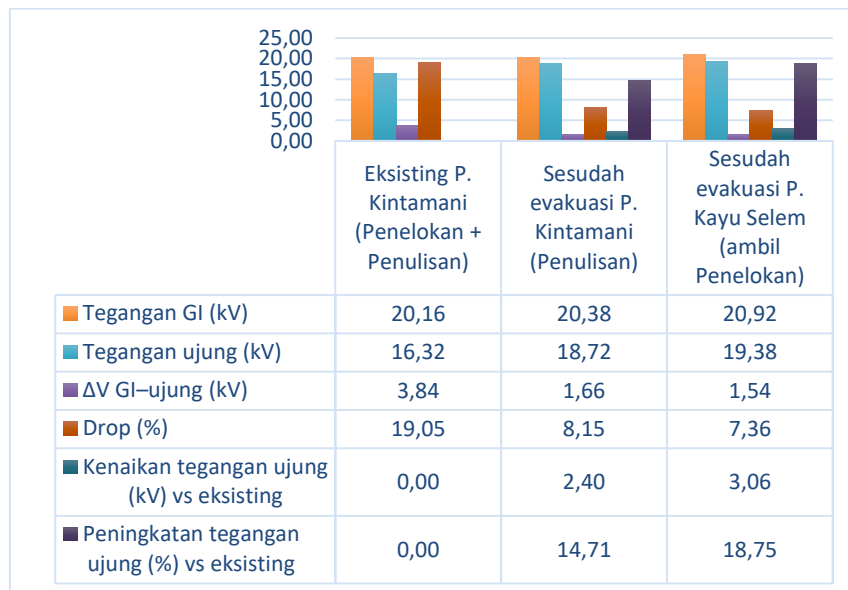
Gambar 5 memperlihatkan kondisi eksisting pada ujung penyulang, dimana tegangan yang terbaca di titik ujung berada pada 16,32 kV. Nilai ini menunjukkan penurunan tegangan yang cukup besar dibandingkan tegangan di sisi hulu (GI), sehingga menggambarkan bahwa ujung penyulang berada dalam kondisi kritis. Secara operasional, tegangan ujung 16,32 kV setara dengan 81,6% dari tegangan nominal 20 kV, sehingga mutu tegangan pada pelanggan di sisi hilir jaringan berpotensi tidak optimal. Kondisi ini selaras dengan karakteristik jaringan distribusi radial, dimana semakin panjang lintasan dan semakin besar arus beban yang mengalir, maka jatuh tegangan akan semakin meningkat.



Gambar 6. Tegangan ujung sesudah evakuasi daya (ETAP).

Gambar 6 menunjukkan kondisi setelah pekerjaan evakuasi daya diterapkan. Pada skenario ini, tegangan ujung meningkat menjadi 19,38 kV. Kenaikan tegangan ujung sebesar 3,06 kV dibanding kondisi eksisting mengindikasikan perbaikan profil tegangan yang nyata, karena tegangan di titik hilir menjadi lebih mendekati tegangan nominal. Secara persentase terhadap kondisi sebelum, peningkatan tegangan ujung mencapai 18,75% $[(19,38 - 16,32) /$

16,32 × 100%]. Jika dinyatakan terhadap tegangan nominal 20 kV, tegangan ujung meningkat dari 81,6% menjadi 96,9%, yang berarti terjadi perbaikan mutu tegangan sebesar 15,3 poin persentase terhadap nominal.



Gambar 7. Perbandingan Tegangan Sebelum dan Sesudah Evakuasi Daya (Tegangan Ujung dan Drop Tegangan).

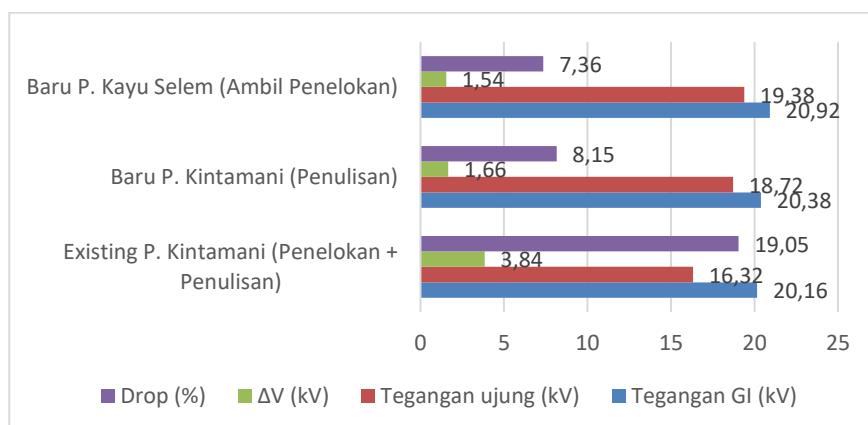
Berdasarkan Gambar 7, penerapan evakuasi daya menghasilkan perbaikan signifikan pada profil tegangan sisi hilir jaringan, dimana tegangan ujung meningkat dari 16,32 kV (drop 19,05%) pada kondisi eksisting menjadi 18,72 kV pada Penyulang Kintamani (Penulisan) dan 19,38 kV pada Penyulang Kayu Selem. Secara kuantitatif, terjadi kenaikan sebesar 2,40 kV (14,71%) dan 3,06 kV (18,75%), yang menunjukkan tegangan semakin mendekati nilai nominal sistem. Perbaikan ini juga diikuti oleh penurunan jatuh tegangan dari 3,84 kV (19,05%) menjadi 1,66 kV (8,15%) dan 1,54 kV (7,36%), sehingga mengindikasikan peningkatan kinerja penyaluran daya. Dengan demikian, evakuasi daya terbukti efektif dalam meningkatkan mutu tegangan sekaligus menekan drop tegangan pada titik kritis jaringan.

Analisis profil tegangan difokuskan pada tegangan di Gardu Induk (GI) dan tegangan ujung penyulang, karena titik ujung jaringan umumnya menjadi lokasi paling kritis terhadap jatuh tegangan. Parameter yang digunakan adalah tegangan pada sisi sumber (Gardu Induk/GI) dan tegangan pada ujung penyulang, karena selisih keduanya merepresentasikan besarnya jatuh tegangan (ΔV) yang terjadi sepanjang saluran. Dengan membandingkan kondisi eksisting dan kondisi sesudah evakuasi pada penyulang yang terdampak, dapat diukur derajat perbaikan mutu tegangan serta penurunan tingkat drop tegangan sebagai indikator peningkatan kinerja penyaluran daya.

Tabel 2. Perbandingan Tegangan GI–Ujung Penyulang dan Drop Tegangan Sebelum dan Sesudah Evakuasi Daya.

Kondisi	Objek	Tegangan GI (kV)	Tegangan ujung (kV)	ΔV (kV)	Drop (%)	Catatan
Existing	P. Kintamani (Penelokan + Penulisan)	20.16	16.32	3.84	19.05	Ujung penyulang kritis
Baru	P. Kintamani (Penulisan)	20.38	18.72	1.66	8.15	Sesudah pemisahan beban
Baru	P. Kayu Selem (Ambil Penelokan)	20.92	19.38	1.54	7.36	Evakuasi beban Penelokan

Berdasarkan Tabel 2, kondisi eksisting menunjukkan profil tegangan sisi hilir yang kurang baik, dengan tegangan ujung 16,32 kV dari 20,16 kV di GI dan drop sebesar 3,84 kV (19,05%), yang mencerminkan jatuh tegangan tinggi akibat karakteristik jaringan radial dengan beban besar dan lintasan panjang. Setelah evakuasi daya, drop tegangan menurun signifikan menjadi 1,66 kV (8,15%) pada Penyulang Kintamani (Penulisan) dan 1,54 kV (7,36%) pada Penyulang Kayu Selem, atau turun masing-masing 10,90 dan 11,69 poin persentase (sekitar 57,2% dan 61,3% relatif terhadap kondisi awal). Penurunan ini diikuti peningkatan tegangan ujung menjadi 18,72 kV dan 19,38 kV, yang menunjukkan bahwa konfigurasi baru melalui pemisahan beban dan redistribusi aliran daya mampu menurunkan arus pada segmen kritis, memperpendek lintasan dominan, serta meningkatkan mutu tegangan pada ujung jaringan.

**Gambar 8.** Perbandingan Tegangan GI–Ujung Penyulang dan Drop Tegangan.

Perhitungan Saving kWh

Perhitungan saving kWh pada penelitian ini dilakukan untuk mengkuantifikasi besarnya energi yang dapat “diselamatkan” sebagai dampak langsung dari penurunan rugi-rugi daya aktif (losses) setelah pekerjaan evakuasi daya diterapkan. Secara konseptual, rugi-rugi daya aktif merupakan komponen daya yang hilang pada jaringan akibat resistansi penghantar dan pembebanan arus (I^2R), sehingga apabila konfigurasi jaringan menghasilkan losses yang lebih rendah, maka terdapat potensi penghematan energi yang secara agregat akan terlihat dalam satuan kWh per tahun. Oleh karena itu, saving kWh dihitung berdasarkan selisih losses aktif total hasil simulasi ETAP antara kondisi eksisting dan kondisi sesudah evakuasi daya.

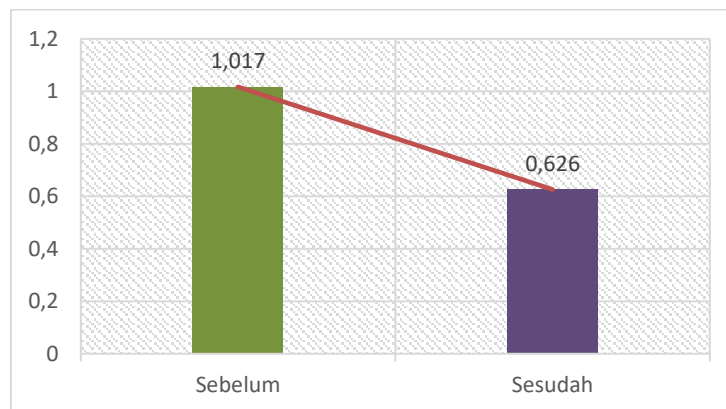
Pengurangan losses aktif didefinisikan sebagai:

$$\Delta P_{loss} = P_{loss_sebelum} - P_{loss_sesudah}$$

Berdasarkan hasil simulasi, losses aktif total pada kondisi eksisting adalah 1,017 MW, sedangkan pada kondisi sesudah evakuasi daya turun menjadi 0,626 MW. Dengan demikian, pengurangan losses aktif adalah:

$$\Delta P_{loss} = 1,017 \text{ MW} - 0,626 \text{ MW} = 0,391 \text{ MW}$$

Nilai tersebut setara dengan 391 kW.



Gambar 9. Perbandingan Rugi-Rugi Daya (Losses) Sebelum dan Sesudah Pekerjaan Evakuasi Daya.

Berdasarkan grafik perbandingan rugi-rugi daya, terlihat bahwa terjadi penurunan losses yang signifikan setelah dilakukan pekerjaan evakuasi daya. Nilai rugi-rugi daya pada kondisi sebelum sebesar 1,017 MW mengalami penurunan menjadi 0,626 MW pada kondisi sesudah. Hal ini menunjukkan adanya penurunan sebesar 0,391 MW atau sekitar 38,45%, yang mengindikasikan peningkatan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik. Penurunan ini terjadi karena adanya redistribusi beban melalui rekonfigurasi jaringan yang lebih optimal, sehingga aliran daya menjadi lebih merata dan mengurangi kerugian energi pada penyulang. Untuk

mengkonversi pengurangan daya (kW) menjadi penghematan energi tahunan (kWh/tahun), digunakan asumsi jam operasi sistem sepanjang satu tahun, yaitu 8760 jam. Dengan demikian, saving energi tahunan dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Saving energi (kWh/tahun)} = \Delta P_{\text{loss}} \text{ (kW)} \times 8760 \text{ (jam/tahun)}$$

Maka diperoleh:

$$\text{Saving energi tahunan} = 391 \text{ kW} \times 8760 \text{ jam} = 3.425.160 \text{ kWh/tahun}$$

atau setara dengan 3.425,16 MWh/tahun.

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa penerapan evakuasi daya berkontribusi pada pengurangan energi hilang akibat losses aktif dalam skala tahunan. Secara operasional, nilai saving kWh ini dapat digunakan sebagai dasar untuk menilai dampak efisiensi penyaluran daya, baik dari perspektif kinerja teknis jaringan maupun sebagai input awal untuk perhitungan manfaat ekonomi apabila saving kWh dikonversi menggunakan parameter biaya energi (Rp/kWh) sesuai kebijakan evaluasi internal. Selain itu, besarnya saving kWh juga memperkuat keterkaitan antara penurunan losses yang diperoleh pada hasil load flow dengan perbaikan konfigurasi jaringan, karena penghematan energi dihitung langsung dari ΔP_{loss} yang dihasilkan oleh perubahan arus dan distribusi beban setelah evakuasi daya.

Efisiensi Pekerjaan Evakuasi Daya

Efisiensi pekerjaan evakuasi daya pada penelitian ini ditetapkan sebagai ukuran kinerja teknis yang merepresentasikan kemampuan konfigurasi jaringan sesudah evakuasi dalam menurunkan rugi-rugi daya aktif (*losses*) dibandingkan kondisi eksisting. Pendekatan ini dipilih karena losses aktif merupakan indikator langsung dari tingkat energi yang hilang pada jaringan akibat resistansi penghantar dan arus beban (I^2R). Dengan demikian, semakin besar penurunan losses aktif yang dicapai setelah perubahan konfigurasi, semakin tinggi efisiensi teknis pekerjaan evakuasi daya dalam konteks peningkatan performa penyaluran daya.

Secara operasional, efisiensi dihitung sebagai persentase penurunan losses aktif total dengan membandingkan losses aktif sebelum dan sesudah pekerjaan evakuasi daya. Rumus yang digunakan adalah:

$$\eta_{\text{evakuasi}} = \frac{P_{\text{losssebelum}} - P_{\text{losssesudah}}}{P_{\text{losssebelum}}} \times 100\%$$

Berdasarkan hasil simulasi load flow ETAP, losses aktif total pada kondisi eksisting sebesar 1,017 MW, sedangkan losses aktif total pada kondisi sesudah evakuasi daya sebesar 0,626 MW. Substitusi nilai tersebut ke dalam persamaan menghasilkan:

$$\eta_{evakuasi} = \frac{1,017 - 0,626}{1,017} \times 100\%$$

$$\eta_{evakuasi} = 38,45\%$$

Efisiensi sebesar 38,45% menunjukkan bahwa evakuasi daya berhasil menurunkan losses aktif sebesar 0,391 MW (dari 1,017 MW menjadi 0,626 MW), yang mengindikasikan peningkatan kinerja penyaluran daya dan sejalan dengan target pengendalian susut jaringan Ditjen Ketenagalistrikan sebesar 9,01% pada tahun 2025. Dari sisi mutu tegangan, hasil simulasi dibandingkan dengan standar SPLN 1:1995 (18–21 kV) menunjukkan bahwa kondisi eksisting dengan tegangan ujung 16,32 kV tidak memenuhi standar akibat tingginya drop tegangan (19,05%), sedangkan setelah evakuasi daya, tegangan ujung meningkat menjadi 18,72 kV dan 19,38 kV dengan penurunan drop menjadi 8,15% dan 7,36%, sehingga memenuhi batas toleransi dan mencerminkan perbaikan signifikan pada sisi hilir jaringan (PT PLN (Persero), 1995, 2010). Selain itu, evaluasi teknis ini dilengkapi dengan analisis ekonomi menggunakan indikator *payback period* (PBP) untuk menilai kelayakan investasi berdasarkan kemampuan penghematan tahunan akibat penurunan losses dalam menutup biaya investasi awal.

Tabel 3. Rekapitulasi Saving Tahunan, Nilai Penghematan Rupiah, Biaya Investasi, dan *Payback Period* (PBP).

Komponen	Nilai	Satuan/Keterangan
Saving energi tahunan	3.425.160,00	kWh/tahun
Harga Rp/kWh	1.500	Rp/kWh
Saving tahunan (rupiah)	5.137.740.000,00	Rp/tahun
Biaya investasi (RAB PLN)	7.198.809.000,00	Rp
Payback Period (PBP)	1,40	tahun

Tabel 3 menunjukkan komponen utama perhitungan *Payback Period* (PBP) yang diawali dari saving energi tahunan sebesar 3.425.160 kWh/tahun hasil penurunan losses, yang dikonversi menjadi nilai ekonomi sebesar Rp5.137.740.000,00/tahun dengan asumsi Rp1.500/kWh sebagai manfaat tahunan (*annual benefit*). Dengan biaya investasi pekerjaan evakuasi daya sebesar Rp7.198.809.000,00, diperoleh nilai PBP sebesar 1,40 tahun, yang berarti investasi dapat kembali dalam waktu relatif singkat sejak proyek dioperasikan. Nilai ini menunjukkan kelayakan ekonomi yang kuat karena jauh di bawah kriteria $PBP \leq 5$ tahun, sehingga pekerjaan evakuasi daya tidak hanya memberikan manfaat teknis berupa penurunan

losses dan perbaikan profil tegangan, tetapi juga layak secara finansial dan dapat dijadikan dasar penguatan usulan proyek dalam proses evaluasi dan persetujuan anggaran.

Pembahasan

Hasil simulasi *load flow* menunjukkan perbaikan kinerja jaringan setelah penerapan evakuasi daya. Pada kondisi eksisting, total beban sebesar 5,015 MW dan 3,080 Mvar dengan losses aktif 1,017 MW dan losses reaktif 0,822 Mvar, sedangkan pada kondisi sesudah evakuasi beban relatif stabil di 5,113 MW dan 3,141 Mvar, namun losses aktif menurun menjadi 0,626 MW dan losses reaktif menjadi 0,647 Mvar. Penurunan losses aktif sebesar 0,391 MW (391 kW) ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi bukan disebabkan oleh penurunan beban, melainkan oleh perubahan konfigurasi jaringan yang memodifikasi pola aliran daya dan distribusi arus, sehingga rugi-rugi I^2R pada penghantar berkurang. Secara teknis, evakuasi daya melalui redistribusi beban antara Penyulang Kintamani dan Penyulang Kayu Selem menghasilkan pembebanan jaringan yang lebih seimbang, mengurangi arus pada segmen kritis, serta menekan losses aktif dan reaktif secara simultan. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemisahan beban dan pengalihan aliran daya tidak hanya berdampak pada parameter numerik, tetapi juga memperbaiki mekanisme operasi sistem sehingga mendukung efisiensi dan mutu tegangan. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Prasad et al., (2024) yang menunjukkan bahwa ETAP efektif dalam mengevaluasi berbagai skenario operasi sistem tenaga melalui analisis aliran daya, serta didukung oleh Kundur & Malik (2022) yang menegaskan bahwa optimasi konfigurasi dan pembagian beban merupakan kunci peningkatan efisiensi sistem tenaga. Dengan demikian, simulasi pada penelitian ini memperkuat peran ETAP sebagai alat evaluasi teknis dalam menilai efektivitas intervensi operasional, khususnya evakuasi daya, melalui indikator terukur berupa penurunan losses.

Dalam sistem distribusi, losses aktif mencerminkan energi yang hilang akibat rugi-rugi resistif (I^2R), sehingga penurunannya dapat diinterpretasikan sebagai energi yang terselamatkan. Berdasarkan hasil simulasi, losses aktif menurun dari 1,017 MW menjadi 0,626 MW, sehingga diperoleh ΔP_{loss} sebesar 0,391 MW (391 kW) yang jika dikonversi dengan asumsi operasi 8760 jam/tahun menghasilkan saving energi sebesar 3.425.160 kWh/tahun (3.425,16 MWh/tahun). Nilai ini menunjukkan bahwa evakuasi daya tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis, tetapi juga memberikan dampak energi yang signifikan melalui redistribusi beban dan penurunan arus pada segmen kritis, sehingga rugi-rugi I^2R berkurang secara non-linear meskipun beban relatif stabil. Saving kWh tersebut merupakan estimasi berbasis simulasi steady state yang mencerminkan potensi penghematan apabila kondisi operasi mendekati skenario model, sehingga dapat diposisikan sebagai indikator teknis-

energetik sekaligus dasar evaluasi ekonomi. Secara metodologis, temuan ini sejalan dengan Prasad et al., (2024) yang menegaskan efektivitas ETAP dalam mengevaluasi losses dan parameter sistem melalui skenario operasi, serta didukung oleh Kundur & Malik (2022) yang menyatakan bahwa optimasi konfigurasi dan pembagian beban dapat meningkatkan efisiensi sistem tenaga. Dengan demikian, saving kWh dalam penelitian ini merupakan turunan langsung dari hasil simulasi load flow ETAP yang memperluas interpretasi kinerja jaringan dari sekadar losses menjadi manfaat energi yang terukur.

Efisiensi pekerjaan evakuasi daya pada penelitian ini tercermin dari penurunan losses aktif dari 1,017 MW menjadi 0,626 MW, sehingga diperoleh efisiensi sebesar 38,45%, yang menunjukkan peningkatan signifikan kinerja penyaluran daya akibat perubahan konfigurasi jaringan. Efisiensi ini sejalan dengan mekanisme teknis berupa pemisahan beban dan redistribusi aliran daya yang menurunkan arus pada segmen kritis, sekaligus konsisten dengan perbaikan profil tegangan pada sisi hilir. Temuan ini didukung oleh Prasad et al., (2024) yang menegaskan bahwa ETAP efektif dalam mengevaluasi kinerja jaringan melalui perbandingan skenario operasi, serta oleh Kundur & Malik (2022) yang menyatakan bahwa optimasi konfigurasi dan pembagian beban dapat meningkatkan efisiensi sistem tenaga. Dari sisi ekonomi, penurunan losses menghasilkan saving energi sebesar 3.425.160 kWh/tahun yang setara Rp5.137.740.000,00/tahun (dengan asumsi Rp1.500/kWh), dibandingkan dengan biaya investasi Rp7.198.809.000,00, sehingga diperoleh nilai *payback period* (PBP) sebesar 1,40 tahun. Nilai ini menunjukkan proyek layak secara ekonomi karena berada di bawah kriteria $PBP \leq 5$ tahun, sekaligus konsisten dengan konsep analisis ekonomi teknik bahwa semakin besar manfaat tahunan terhadap investasi, semakin cepat periode pengembalian (Blank & Tarquin, 2014). Dengan demikian, efisiensi teknis yang dihasilkan dari simulasi ETAP berimplikasi langsung pada manfaat ekonomi melalui saving energi, sehingga memperkuat kelayakan implementasi evakuasi daya sebagai strategi peningkatan kinerja jaringan distribusi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya (*load flow*) menggunakan ETAP pada jaringan distribusi 20 kV di wilayah kerja PLN UID Bali UP3 Bali Timur (objek pekerjaan evakuasi daya dari Penyulang Kintamani Line Penelokan menuju Penyulang Kayu Selem), dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Hasil simulasi menunjukkan perbaikan kinerja jaringan, dimana losses aktif turun dari 1,017 MW menjadi 0,626 MW (berkurang 0,391 MW), disertai peningkatan tegangan ujung dari 16,32 kV (di bawah standar) menjadi 18,72 kV dan 19,38 kV, serta

penurunan drop tegangan dari 19,05% menjadi 8,15% dan 7,36%, sehingga mutu tegangan telah memenuhi standar pelayanan.

- 2) Penurunan losses aktif menghasilkan saving energi sebesar 3.425.160 kWh/tahun (3.425,16 MWh/tahun), yang mencerminkan potensi penghematan energi tahunan akibat berkurangnya susut daya setelah evakuasi.
- 3) Efisiensi evakuasi daya mencapai 38,45%, dengan payback period (PBP) sebesar 1,40 tahun, menunjukkan proyek layak secara ekonomis karena mampu mengembalikan investasi dalam waktu singkat dan berada di bawah kriteria kelayakan (< 5 tahun) (Blank & Tarquin, 2014; Kadir, 2000).

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar hasil simulasi ETAP, khususnya perbandingan sebelum dan sesudah evakuasi daya, dapat dimanfaatkan sebagai referensi dalam penyusunan dokumen kelayakan proyek (KKP) melalui penyajian indikator kuantitatif seperti losses, drop tegangan, tegangan ujung, saving kWh, dan efisiensi. Selanjutnya, penelitian berikutnya dapat mengembangkan metode pemeringkatan prioritas perbaikan jaringan berbasis parameter teknis seperti drop tegangan awal, potensi penurunan losses, dan saving kWh tahunan. Selain itu, diperlukan validasi lapangan terhadap hasil simulasi serta pertimbangan variasi beban (jam puncak dan luar puncak) agar analisis dan estimasi saving energi menjadi lebih akurat dan representatif terhadap kondisi operasional sistem distribusi.

REFERENSI

- Abdi, H. (2024). Power system analysis using the ETAP software: A comprehensive review. *Journal of Energy Management and Technology (JEMT)*, 8(3), 250.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2014). *Basics of engineering economy*. McGraw-Hill.
- Cavus, M. (2024). Integration of smart grids, distributed generation, and cybersecurity: Strategies for securing and optimizing future energy systems (pp. 0–34).
- Gönen, T. (2014). *Electrical power distribution engineering*. CRC Press.
- Hasanah, A. W., Koerniawan, T., & Yuliansyah, Y. (2019). Kajian kualitas daya listrik PLTS sistem off-grid di STT-PLN. *Energi & Kelistrikan*, 10(2), 93–101.
- Ihsan, A., Erhaneli, E., & Anthony, Z. (2023). Analisis pengaruh jarak antar fasa terhadap rugi korona pada saluran udara tegangan ekstra tinggi 275 kV. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 22(2), 158–165.
- Junito, R., Putra, D. E., Yani, R. A., & Nofiansah. (2025). Pengaruh fluktuasi tegangan akibat blackout pada saluran distribusi 20 kV terhadap kinerja arrester. *Jurnal Ampere*, 10(1), 117–123.

- Kadir, A. (2000). *Distribusi dan utilisasi tenaga listrik*. UI Press.
- Khoirunnisa, N., Inayah, N., Wiherdiansyah, F., Adyano, I. K. D., & Aribowo, D. (2024). Studi literatur tentang jenis dan penyebab gangguan pada saluran transmisi. *Surya Teknika*, 11, 569–573.
- Kisworo, D., Utomo, A. P., Saputra, Y. A., & Stefanie, A. (2025). Analisis rugi-rugi daya pada penyulang Sukamulya di PT PLN (Persero) UP3 Purwakarta dengan menggunakan software ETAP. *Journal of Informatics and Electrical Engineering*, 7(1), 46–54.
- Kundur, P. S., & Malik, O. P. (2022). *Power system stability and control*. McGraw-Hill Education.
- Manembu, P. D., Kewo, A., & Singgeta, R. L. (2021). Pemodelan data konsumsi listrik melalui sistem intelligensia smart-meter. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 10(2), 153.
- Marisa, U. L. P., & Humena, S. (2025). Analisis rekonfigurasi jaringan distribusi 20 kV PLN ULP Marisa. *Jurnal Teknik Elektro*, 7, 295–301.
- Mugandi, N. M. (2022). Pemeliharaan jaringan distribusi SUTM 20 kV (penyulang Mawar) di PT PLN ULP Kampar. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Renewable Energy*, 2(2), 85–95.
- Muhtar, A., Iwan, Antarissubhi, & Suryani. (2022). Analisis rugi daya jaringan distribusi primer PT PLN ULP Sengkang Sulawesi Selatan.
- Nugroho, T. W., Mustaqim, I., & Wardhana, A. S. J. (2025). Studi kualitas daya listrik (power quality) di bangunan gedung XYZ. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(2).
- Pan, H., Dou, Z., Cai, Y., Li, W., Lei, X., & Han, D. (2020). Digital twin and its application in power system.
- Panggabean, M., Surapati, A., & Rosa, M. K. A. (2022). Pengaruh total harmonic distortion (THD) terhadap pembacaan kWh meter semi digital. *Jurnal Amplifier: Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro dan Komputer*, 12(1), 25–33.
- Prasad, B. M., Ganesh, P., Vinay Kumar, K., Mohanarao, P. A., Swathi, A., & Manoj, V. (2024). Renewable energy integration in modern power systems: Challenges and opportunities. *E3S Web of Conferences*, 591.
- PT PLN (Persero). (1995). *Tegangan-tegangan standar (SPLN 1:1995)*.
- PT PLN (Persero). (2010). *Standar konstruksi sambungan tenaga listrik*.
- Putra, D. E., Riswanto, Y., & Komaini, A. (2021). Investigasi overload transformator distribusi 20 kV di unit layanan pelanggan Pangkalan Balai PT PLN (Persero). *Seminar Nasional AVoER XIII*, 378–383.
- Rahmaan, A. B. A., Penangsang, O., & Aryani, N. K. (2016). Optimalisasi penempatan kapasitor bank untuk memperbaiki kualitas daya pada sistem kelistrikan PT Semen Indonesia Aceh menggunakan metode genetic algorithm (GA). *Jurnal Teknik ITS*, 5(2).

- Ramadhan, R. (2023). Analisis load flow pada kilang dan utilitas PPSDM MIGAS. *Jurnal Nasional Pengelolaan Energi MigasZoom*, 5(1), 1–10.
- Saadat, H. (1999). *Power system analysis*.
- Sahbana, M. F., & Suheta, T. (2021). Perencanaan saluran kabel tegangan menengah pada jaringan distribusi 20 kV di penyulang Pasar Kembang. *SinarFe7*, 4(1), 118–120.
- Suhadi. (2008). *Teknik distribusi tenaga listrik jilid III (Buku ajar)*. Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Syaputra, A., & Ervianto, E. (2017). Perhitungan rugi daya saluran distribusi primer 20 kV feeder Adi Sucipto di GI Garuda Sakti dengan metode ladder iterative technique. *JOM FTEKNIK*, 4(1), 1–10.
- Wasahua, S., Rikumahu, J. J., & Kastanja, A. J. (2023). Analisa penyebab gangguan jaringan distribusi GI Sirimau PT PLN (Persero) area Ambon menggunakan metode FTA (fault tree analysis). *Jurnal ELKO (Elektrikal dan Komputer)*, 2(2).
- Wood, A. J., & Wollenberg, B. (1996). *Power generation, operation and control (2nd ed.)*.
- Yansuri, D. S., Subianto, S., & Akbar, M. A. (2021). Evaluasi jenis kabel dari tembaga ke aluminium untuk distribusi power supply 20 kV coal conveyor. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(2), 9–17.
- Yusiran, Y., & Hasanudin, H. (2025). Analisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya dan efisiensi transformator step down 20 kV/400 V. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 5(3), 2113–2120.