

ANALISIS PERBAIKAN JATUH TEGANGAN DAN REDUKSI RUGI DAYA MELALUI UPRATING KONDUKTOR SERTA PENYEIMBANGAN BEBAN PADA SISTEM DISTRIBUSI DI PT. PLN ULP TEBING TINGGI

Ismail¹, Dino Erivianto², Zuraidah Tharo³

^{1,2,3}Teknik Elektro, Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi

Email : ismailrmb@gmail.com¹, derivianto@gmail.com², zuraidahtharo@dosen.pancabudi.ac.id³

Abstrak

Analisis perbaikan jatuh tegangan dan reduksi rugi daya melalui uprating konduktor serta penyeimbangan beban pada sistem distribusi di PT. PLN ULP Tebing Tinggi. Sistem distribusi tenaga listrik sering menghadapi tantangan operasional signifikan pada jaringan tegangan rendah, terutama di wilayah dengan karakteristik panjang saluran besar, konduktor berpenampang terbatas, dan ketidakseimbangan beban antar fasa. Di ULP Tebing Tinggi, fenomena jatuh tegangan tinggi tercatat di ujung feeder jauh dari gardu utama, sementara rugi daya akibat aliran arus dan resistansi saluran menjadi beban biaya dan teknis bagi penyedia layanan. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis teknis yang menggabungkan pengukuran lapangan, perhitungan matematis, dan simulasi sistem tenaga menggunakan software ETAP. Pengukuran menunjukkan beban total gardu TT38 mencapai 91,69 kVA dengan ketidakseimbangan arus yang signifikan. Tegangan di ujung jaringan mengalami penurunan drastis menjadi 184 V dari tegangan pangkal 222-228 V, dengan jatuh tegangan sebesar 25,26% dan rugi daya 14,94 kW. Skenario uprating konduktor dengan mengganti kabel TIC 2×10 mm² menjadi TIC 3×70+1×50 mm² pada segmen 250 meter terakhir menunjukkan peningkatan signifikan. Hasil perhitungan dan simulasi ETAP konsisten menunjukkan penurunan jatuh tegangan dari 25,26% menjadi 3,61% (202,24 V) dan pengurangan rugi daya dari 14,94 kW menjadi 12,37 kW. Perbaikan ini berhasil membawa tegangan minimum ke dalam batas standar SPLN (198-231 V) yang sebelumnya tidak terpenuhi.

Kata Kunci : Jatuh Tegangan, Rugi Daya, Uprating Konduktor, Simulasi ETAP

Abstract

Analysis of voltage drop improvement and power loss reduction through conductor uprating and load balancing in the distribution system at PT. PLN ULP Tebing Tinggi. Electrical power distribution systems often face significant operational challenges in low voltage networks, especially in areas with long lines, limited conductor cross-sections, and phase load imbalances. At ULP Tebing Tinggi, high voltage drops were recorded at the end of feeders far from the main substation, while power losses due to current flow and line resistance became a financial and technical burden for service providers. This study used a quantitative approach based on technical analysis that combined field measurements, mathematical calculations, and power system simulations using ETAP software. Measurements showed that the total load of the TT38 substation reached 91.69 kVA with significant current imbalance. The voltage at the end of the network dropped dramatically to 184 V from the base voltage of 222-228 V, with a voltage drop of 25.26% and power loss of 14.94 kW. The conductor uprating scenario, which involved replacing the 2×10 mm² TIC cable with a 3×70+1×50 mm² TIC cable on the last 250-metre segment, showed a significant improvement. The results of calculations and ETAP simulations consistently show a decrease in voltage drop from 25.26% to 3.61% (202.24 V) and a reduction in power loss from 14.94 kW to 12.37 kW. This improvement successfully brought the minimum voltage within the SPLN standard limit (198-231 V), which was previously not met.

Keywords : Voltage drop, Uprating, Power loss, Load balancing



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

1. Pendahuluan

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian penting dalam rantai penyediaan energi yang menjangkau konsumen akhir, dan sering kali menghadapi tantangan operasional yang signifikan pada jaringan tegangan rendah. Di banyak daerah layanan, termasuk jaringan milik PT. PLN (Persero) Wilayah Sumatera Utara (UP3 Pematang Siantar, ULP Tebing Tinggi Jl. L. Sujono), karakteristik jaringan distribusi seperti panjang saluran yang besar, konduktor dengan penampang terbatas, serta beban yang tidak merata antar fasa menimbulkan kondisi yang memperparah kualitas tegangan dan efisiensi pengiriman listrik. Fenomena jatuh tegangan (voltage drop) yang tinggi sering tercatat di ujung feeder jauh dari gardu utama, sementara rugi daya (losses) akibat aliran arus dan resistansi saluran menjadi beban biaya dan teknis yang nyata bagi penyedia layanan listrik.

Ketidakseimbangan beban tiga fasa merupakan salah satu faktor penyumbang utama terhadap kondisi tersebut. Berbagai studi internasional dan nasional menunjukkan bahwa beban yang tidak seimbang menyebabkan arus netral meningkat, aliran arus fasa yang berbeda besar, dan akhirnya memicu peningkatan losses serta penurunan tegangan yang lebih cepat dibanding kondisi seimbang (lihat studi oleh Elkholy et al. (2024) yang menunjukkan tajamnya dampak beban tidak seimbang terhadap losses dan kualitas tegangan). Penelitian lainnya menguatkan bahwa redistribusi beban antar fasa (load balancing) dapat memperbaiki efisiensi jaringan distribusi dengan menurunkan arus netral dan losses yang terkait (Sidabalok dkk., 2025 menunjukkan penurunan arus netral dari 150 A ke 97 A setelah balancing di jaringan ULP PLN).

Sisi lain dari persoalan ini adalah kondisi fisik jaringan, dimana konduktor dengan penampang yang kecil dan panjang saluran yang jauh dari trafo/ gardu. Ketika arus beban meningkat dan konduktor tetap, resistansi saluran ($R = \rho \cdot L/A$) meningkat atau tetap tinggi, sehingga losses I^2R menjadi signifikan dan tegangan di titik ujung turun secara substansial. Penelitian oleh Ochoa (2005) mengungkap bahwa beban tidak seimbang bersama dengan resistansi saluran yang tidak memadai menyebabkan penambahan losses yang substansial dalam sistem distribusi. Selain itu, Khoshnodi (2023) mengemukakan bahwa balancing beban pada jaringan tegangan rendah dapat menurunkan losses hingga dua digit persen—menegaskan bahwa intervensi teknis seperti konduktor uprating dan load balancing memiliki potensi besar untuk perbaikan.

Di wilayah layanan PT. PLN (Persero) Wilayah Sumatera Utara — khususnya ULP Tebing Tinggi Jl. L. Sujono — telah tercatat kondisi jaringan dengan panjang feeder mencapai beberapa kilometer, beban per fasa yang tidak seimbang dan tegangan ujung yang berada di bawah ambang standar pelayanan. Kondisi ini menjadi dasar bagi penelitian yang menggabungkan dua pendekatan teknis: penggantian konduktor (uprating) dan penyeimbangan beban (load balancing) secara simultan — dengan harapan mencapai perbaikan tegangan dan pengurangan losses secara lebih optimal. Pendekatan ganda ini penting karena intervensi tunggal sering kali hanya mengatasi satu sisi masalah (misalnya hanya penggantian konduktor tanpa memperhatikan ketidakseimbangan beban atau sebaliknya), sehingga peningkatan efisiensi jaringan belum optimal.

Penelitian ini bertujuan melakukan analisis kuantitatif terhadap jaringan distribusi di ULP Tebing Tinggi (UP3 Pematang Siantar) dengan memperhitungkan kondisi eksisting, kemudian



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

mengevaluasi skenario uprating konduktor saja, balancing beban saja, dan kombinasi keduanya. Harapannya, hasil penelitian ini dapat memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif untuk unit distribusi dan menambah literatur di bidang teknik tenaga listrik, khususnya dalam konteks jaringan distribusi tegangan rendah di Indonesia. Kontribusi penelitian mencakup model analisis yang mengintegrasikan faktor resistansi saluran dan ketidakseimbangan beban dalam satu kajian, serta data lapangan dari sistem nyata yang sangat relevan bagi kebijakan operasional dan perencanaan jaringan distribusi.

2. Tinjauan Pustaka

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan jaringan yang dirancang untuk menyalurkan daya dari gardu distribusi menuju pelanggan akhir melalui saluran tegangan menengah dan tegangan rendah. Pada jaringan tegangan rendah (JTR), kualitas tegangan dan efisiensi penyaluran energi sangat ditentukan oleh karakteristik fisik konduktor, panjang saluran, jumlah beban, serta tingkat keseimbangan arus antar fasa. Ketika salah satu faktor tersebut berada di luar batas ideal, maka sistem akan mengalami penurunan tegangan (voltage drop) dan kerugian daya (losses) yang semakin besar seiring jarak dan beban. Kondisi semacam ini lazim terjadi pada wilayah distribusi radial di Indonesia, termasuk di jaringan PT PLN (Persero) UP3 Pematang Siantar – ULP Tebing Tinggi, di mana panjang konduktor dapat mencapai beberapa kilometer, beban meningkat secara progresif, sementara ukuran konduktor tidak selalu mengikuti dinamika pertumbuhan permintaan.

Secara teoritis, rugi daya dalam jaringan berbanding lurus dengan kuadrat arus dan resistansi saluran. Persamaan dasar rugi daya yang digunakan dalam sistem distribusi dirumuskan sebagai:

$$P_{loss} = I^2 R$$

dengan I adalah arus beban dan R adalah resistansi konduktor. Resistansi itu sendiri berbanding lurus dengan panjang konduktor dan berbanding terbalik dengan luas penampang, sebagaimana dinyatakan dalam:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

di mana ρ adalah resistivitas material (untuk aluminium sekitar $2.65 \times 10^{-8} \Omega m$), L panjang konduktor, dan A luas penampang. Ketika konduktor berpenampang kecil membawa arus yang tinggi dalam jarak panjang, maka nilai resistansi meningkat sehingga rugi daya bertambah secara drastis. Kondisi ini juga memicu terjadinya penurunan tegangan, yang dalam pendekatan dasar dapat dituliskan sebagai:

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

di mana X adalah reaktansi dan $\cos \phi$ adalah faktor daya beban. Besarnya nilai ΔV menggambarkan seberapa jauh tegangan ujung turun dari tegangan sumber.

Dalam konteks ketidakseimbangan beban tiga fasa, penelitian menunjukkan bahwa perbedaan arus antar fasa menyebabkan peningkatan arus netral serta memperbesar rugi daya total sistem. Beban tidak seimbang menghasilkan komponen urutan negatif dan urutan nol yang memperburuk kualitas tegangan, menimbulkan fluktuasi arus, serta mempercepat penurunan tegangan pada fasa terberat. Ketidakseimbangan ini biasanya dihitung dengan persamaan:



$$I_{takseimbang} = \frac{\max(|I_R - I_{rata-rata}|, |I_S - I_{rata-rata}|, |I_T - I_{rata-rata}|)}{I_{rata-rata}}$$

Ketika ketidakseimbangan mencapai lebih dari 20%, jaringan akan menanggung rugi daya tambahan yang cukup signifikan walaupun konduktor telah memenuhi batas KHA (Kapasitas Hantar Arus). Hal ini menegaskan bahwa balancing beban adalah bagian integral dari manajemen jaringan.

Berbagai literatur internasional dan nasional memberikan perhatian besar kepada manajemen beban (load balancing) sebagai strategi reduksi losses dan peningkatan kualitas tegangan. Balancing beban berfungsi meratakan arus antar fasa sehingga mendekati kondisi ideal, di mana arus netral I_N mendekati nol:

$$I_N = |I_R + I_S + I_T|$$

Pada kondisi seimbang, rugi daya total dapat berkurang secara signifikan karena komponen arus yang tidak produktif menghilang, dan arus tiap fasa berada pada nilai optimal. Sementara itu, teknik uprating konduktor berfokus pada penurunan resistansi saluran dengan cara mengganti konduktor berpenampang kecil menjadi lebih besar. Secara matematis, penurunan resistansi setelah uprating dapat dinyatakan sebagai:

$$R_{baru} = \rho \frac{L}{A_{lebih\ besar}}$$

yang artinya semakin besar nilai A, semakin kecil resistansi dan semakin kecil pula I^2R . Uprating terbukti efektif menurunkan drop tegangan terutama pada jaringan panjang. Namun, literatur juga menunjukkan bahwa melakukan uprating tanpa balancing sering kali tidak memberikan hasil optimal. Jika beban tetap tidak seimbang, maka fasa terberat tetap mengalami drop tegangan dan kerugian tetap tinggi walaupun konduktor sudah diganti.

Kajian gabungan antara uprating konduktor dan balancing beban menjadi penting karena keduanya menasar dua sisi akar masalah: sisi fisik jaringan dan sisi beban. Ketika keduanya dilakukan secara simultan, resistansi saluran menurun dan arus antar fasa menjadi merata, sehingga rugi daya total menurun lebih besar dibanding jika salah satu diterapkan secara terpisah. Pendekatan gabungan ini mulai banyak direkomendasikan pada sistem distribusi dengan karakteristik beban dinamis, jaringan panjang, dan keterbatasan kapasitas infrastruktur lama.

Dalam konteks jaringan di ULP Tebing Tinggi yang memiliki karakter panjang konduktor, ketidakseimbangan beban yang cukup mencolok, serta penggunaan segmen konduktor kecil pada ujung kawasan, pendekatan gabungan menjadi sangat relevan. Literatur juga menunjukkan bahwa jaringan-jaringan semacam inilah yang paling banyak memperoleh manfaat dari strategi optimasi terintegrasi.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif berbasis analisis teknis jaringan distribusi listrik, yang memadukan pengukuran lapangan, perhitungan matematis, serta simulasi sistem tenaga menggunakan perangkat lunak ETAP. Lokasi penelitian berada pada jaringan tegangan rendah PT. PLN (Persero) Wilayah Sumatera Utara, UP3 Pematang Siantar, ULP Tebing Tinggi yang berlokasi di Jl. L. Sujono—wilayah yang memiliki karakteristik



jaringan panjang, beban rumah tangga dan komersial yang terus meningkat, serta ketidakseimbangan arus antar fasa yang cukup signifikan.

3.1 Pengukuran Arus Dan tegangan

Metodologi penelitian dimulai dari proses identifikasi kondisi awal jaringan. Tim melakukan pengamatan langsung pada gardu distribusi yang menjadi objek studi, mencatat ukuran konduktor pada setiap segmen jaringan, panjang penghantar dari trafo menuju konsumen terujung, serta data beban aktual pada setiap fasa. Pada tahap pengukuran lapangan ini, instrumen utama yang digunakan adalah clamp meter untuk mengukur arus fasa R, S, dan T; dan multimeter true RMS untuk mencatat tegangan pangkal di Low Voltage Cabinet (LVC) serta tegangan pada titik-titik ujung jaringan (end of line).

3.2 Menentukan Parameter Resistansi

Setelah data lapangan diperoleh, langkah berikutnya adalah menghitung parameter-parameter teknis yang menjadi dasar perhitungan rugi daya dan tegangan jatuh. Resistansi tiap segmen saluran dihitung berdasarkan persamaan:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

dengan ρ adalah hambatan jenis aluminium sebesar $2,65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, L adalah panjang saluran dalam meter, dan A adalah luas penampang konduktor. Resistansi total jaringan merupakan penjumlahan resistansi dari setiap segmen, sehingga memberikan gambaran menyeluruh mengenai impedansi saluran.

Parameter resistansi ini menjadi masukan untuk menghitung rugi daya pada kondisi existing melalui rumus:

$$P_{loss} = I^2 R$$

Perhitungan dilakukan untuk setiap fasa secara terpisah, baik pada segmen konduktor berpenampang besar (TIC $3 \times 70 + 1 \times 50 \text{ mm}^2$) maupun segmen kecil (TIC $2 \times 10 \text{ mm}^2$). Arus tiap fasa berasal dari hasil pengukuran lapangan, sehingga nilai rugi daya benar-benar menggambarkan kondisi aktual. Setelah itu, penurunan tegangan dihitung menggunakan pendekatan:

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

dengan asumsi reaktansi X mengikuti karakteristik kabel twisted aluminium, dan faktor daya $\cos \phi$ diambil dari nilai rata-rata beban rumah tangga pada jaringan tersebut (sekitar 0,85). Dengan demikian, didapatkan profil tegangan di setiap ujung jaringan sebagai dasar evaluasi apakah kondisi existing memenuhi standar SPLN (+5% / -10%).

3.3 Pemodelan Jaringan Dengan ETAP

Tahap berikutnya adalah proses pemodelan jaringan dalam software ETAP. Data lapangan yang telah dikumpulkan—termasuk panjang saluran, ukuran konduktor, impedansi kabel, kapasitas trafo, serta nilai beban per fasa—kemudian dimasukkan ke dalam suatu single-line diagram. Pemodelan dilakukan menggunakan modul Load Flow Analysis di ETAP, yang mampu menampilkan distribusi tegangan, arus per fasa, rugi daya per segmen, serta arus netral yang timbul akibat ketidakseimbangan beban.



Tahap pemodelan ini tidak hanya mereplikasi kondisi existing, namun juga menjadi platform utama untuk mengevaluasi tiga skenario perbaikan:

1. Skenario Uprating Konduktor, yaitu mengganti seluruh segmen kabel kecil (TIC 2×10 mm²) menjadi kabel yang lebih besar (TIC 3×70+1×50 mm²). Pada tahap ini, resistansi dihitung ulang dengan menggunakan penampang baru, dan model ETAP disesuaikan dengan nilai impedansi kabel yang diambil dari library standar ETAP atau datasheet LVTC.
2. Skenario Balancing Beban, yaitu meratakan beban pada ketiga fasa sedemikian sehingga arus fasa mendekati nilai rata-rata:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

Perubahan ini kemudian dimodelkan kembali dalam software ETAP untuk menilai dampaknya terhadap arus netral, tegangan tiap fasa, serta rugi daya total jaringan.

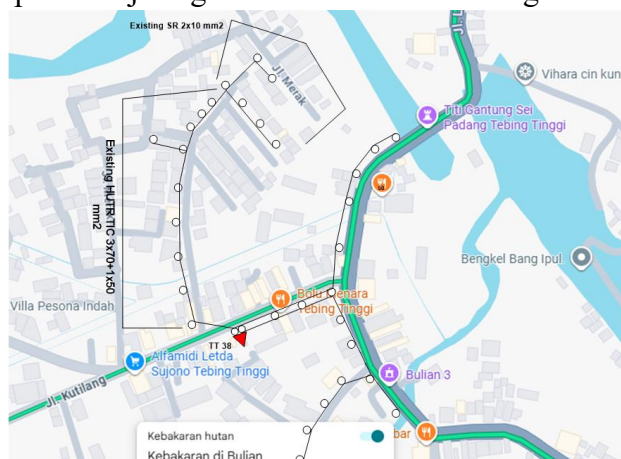
Rumus ketidakseimbangan beban juga dihitung melalui:

$$I_{takseimbang} = \frac{\max(|I_R - I_{rata-rata}|, |I_S - I_{rata-rata}|, |I_T - I_{rata-rata}|)}{I_{rata-rata}}$$

Kedua skenario tersebut kemudian dibandingkan dengan kondisi existing untuk menentukan intervensi mana yang memberikan hasil paling optimal. Evaluasi dilakukan dengan melihat penurunan rugi daya (Δ Loss), perbaikan tegangan ujung (Δ V improvement), dan dampak terhadap arus netral. Dengan demikian, metodologi penelitian ini mengikuti alur terstruktur: mulai dari pengukuran lapangan, formulasi matematis, pemodelan ETAP, simulasi berbagai skenario, hingga komparasi hasil secara kuantitatif.

4. Hasil Dan Pembahasan

Analisis hasil penelitian dilakukan dengan membandingkan kondisi eksisting jaringan distribusi tegangan rendah di ULP Tebing Tinggi dengan skenario perbaikan yang terdiri atas: uprating konduktor dan penyeimbangan beban (balancing). Pembahasan mengintegrasikan hasil perhitungan manual menggunakan rumus dasar listrik (I^2R , resistansi saluran, dan tegangan jatuh) dengan pendekatan simulasi sistem distribusi secara konseptual sebagaimana dilakukan pada studi-studi sebelumnya. Melalui pendekatan ini diperoleh pemahaman menyeluruh mengenai perilaku jaringan dan efektivitas masing-masing tindakan teknis.



Gambar 1. Peta Pelanggan ULP Tebing Tinggi Jl. L. Sujono

Branch Losses Summary Report

CKT / Branch		From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd	Amperes
ID	Phase	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	% Drop in Vmag	in Buried Winding
Cable_1	A	0.027	0.021	-0.022	-0.018	5.2	3.0	98.6	81.4	17.2	
	B	0.023	0.011	-0.022	-0.011	1.2	-0.2	99.4	95.5	3.9	
	C	0.024	0.017	-0.018	-0.017	5.4	-0.6	99.0	86.0	13.0	
Cable_2	A	0.014	0.012	-0.014	-0.012	0.1	0.0	81.4	81.1	0.2	
	B	0.022	0.011	-0.022	-0.011	0.1	0.0	95.5	95.2	0.3	
	C	0.018	0.017	-0.018	-0.017	0.1	0.0	86.0	85.7	0.3	
Cable_3	A	0.004	0.002	-0.003	-0.002	0.3	0.0	81.4	76.9	4.5	
Cable_4	A	0.004	0.003	-0.004	-0.003	0.3	0.0	81.4	77.9	3.5	
T1	A	0.023	0.018	-0.027	-0.021	-4.8	-2.9	100.0	98.6	1.4	0
	B	0.025	0.014	-0.023	-0.011	2.6	3.6	100.0	99.4	0.6	0
	C	0.027	0.019	-0.024	-0.017	3.5	1.7	100.0	99.0	1.0	0
						13.9	4.7				

Gambar 4. Hasil Report Simulasi Power Losses

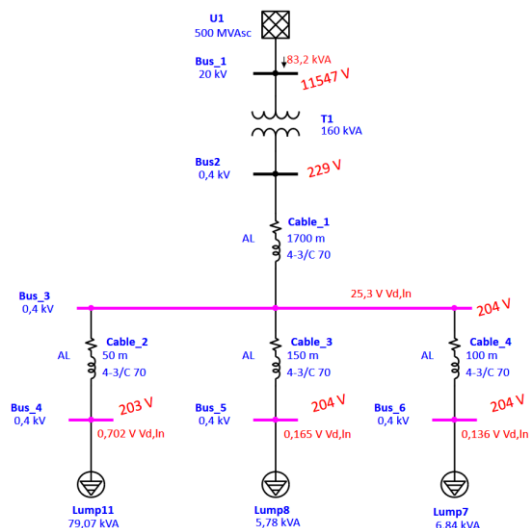
Dari hasil simulasi dengan menggunakan program ETAP yang ada didapatkan tegangan jatuh pada ujung jaringan tegangan rendah sebesar 180 volt dengan losses sebesar 13,9 kW. Untuk itu perlu dilakukan perbaikan mutu tegangan pada ujung JTR guna mengoptimalkan layanan ke pelanggan yang berada di ujung jaringan trafo TT38. Adapun pemodelan perbaikan tegangan ujung pada JTR trafo TT38 dilakukan dengan melakukan upgrading kabel existing TIC 2x10mm² menjadi TIC 3x70+1x50mm² sepanjang 250 meter, dan simulasi dari Unbalanced Load Model dirubah menjadi Conventional Load Model untuk beban seimbang

4.2 Hasil Upgrading Konduktor

Simulasi ETAP untuk Upgrading Konduktor menunjukkan peningkatan signifikan dalam kualitas tegangan pada jaringan distribusi tegangan rendah PT. PLN ULP Tebing Tinggi. Dalam skenario ini, seluruh segmen jaringan menggunakan konduktor berpenampang 70 mm² dengan total panjang 2000 meter yang terdiri dari empat segmen kabel (1700 m, 50 m, 150 m, dan 100 m). Sistem diumpan dari trafo 160 kVA dengan tegangan pangkal 229 V di Bus₂, melayani tiga titik beban utama berkapasitas total 91,69 kVA

Hasil simulasi menunjukkan peningkatan tegangan minimum dari kondisi existing (180 V) menjadi 203-204 V di titik ujung jaringan, dengan tegangan drop total sebesar 25,3 V (11,05% dari tegangan pangkal). Peningkatan ini sangat signifikan karena berhasil membawa tegangan minimum ke dalam batas standar SPLN (198-231 V), yang sebelumnya tidak terpenuhi pada kondisi existing. Tegangan minimum tercatat 203 V pada Bus₃, menunjukkan distribusi tegangan yang lebih merata sepanjang jaringan.

Analisis rugi daya menunjukkan total losses sebesar 12,5 kW, dengan distribusi terbesar pada segmen kabel terpanjang (1700 m) sebesar 11,1 kW (3,7 kW per fasa), diikuti oleh rugi pada segmen 50 m (0,3 kW) dan trafo (1,2 kW). Persentase rugi daya terhadap beban total sekitar 13,6%, yang masih dalam batas wajar untuk jaringan distribusi tegangan rendah.



Gambar 5. Hasil Simulasi Setelah Dilakukan Uprating

Branch Losses Summary Report

CKT / Branch	Phase	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag	Amperes in Buried Winding
		MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To		
Cable_1	A	0.025	0.014	-0.022	-0.014	3.7	0.5	99.1	87.4	11.7	
	B	0.025	0.014	-0.022	-0.014	3.7	0.5	99.1	87.4	11.7	
	C	0.025	0.014	-0.022	-0.014	3.7	0.5	99.1	87.4	11.7	
Cable_2	A	0.019	0.012	-0.019	-0.012	0.1	0.0	87.4	87.1	0.3	
	B	0.019	0.012	-0.019	-0.012	0.1	0.0	87.4	87.1	0.3	
	C	0.019	0.012	-0.019	-0.012	0.1	0.0	87.4	87.1	0.3	
Cable_3	A	0.001	0.001	-0.001	-0.001	0.0	0.0	87.4	87.3	0.1	
	B	0.001	0.001	-0.001	-0.001	0.0	0.0	87.4	87.3	0.1	
	C	0.001	0.001	-0.001	-0.001	0.0	0.0	87.4	87.3	0.1	
Cable_4	A	0.002	0.001	-0.002	-0.001	0.0	0.0	87.4	87.4	0.0	
	B	0.002	0.001	-0.002	-0.001	0.0	0.0	87.4	87.4	0.0	
	C	0.002	0.001	-0.002	-0.001	0.0	0.0	87.4	87.4	0.0	
T1	A	0.026	0.015	-0.025	-0.014	0.4	0.8	100.0	99.1	0.9	0
	B	0.026	0.015	-0.025	-0.014	0.4	0.8	100.0	99.1	0.9	0
	C	0.026	0.015	-0.025	-0.014	0.4	0.8	100.0	99.1	0.9	0
						12.5	3.7				

Gambar 6. Hasil Report Simulasi Power Losses

4.3 Analisis Drop Voltage dan Losess

Adapun hasil perhitungan manual bisa dicari dengan menggunakan perhitungan manual sebagai perbandingan antara perhitungan manual dengan hasil simulasi dari ETAP

a. Perhitungan jatuh tegangan dengan rumus pada jaringan existing bisa dilihat dibawah ini:

$$V_d = \frac{(\sqrt{3} \times \rho \times L \times I \times \cos\theta)}{A}$$

$$V_r = V_s - V_d$$

$$V_{drop_ujung}(\%) = \frac{V_s - V_r}{V_s}$$

Untuk $\rho(Aluminium) = 2,65 \times 10^{-8}$, Panjang $L = 250$ m, $\cos\theta = 0,85$, $V_s = 210$ Volt dan Arus $I = 54,4$ Ampere. Maka didapati jatuh tegangan pada kabel TIC $2 \times 10 \text{mm}^2$ sepanjang 250m adalah:

$$V_d = \frac{(\sqrt{3} \times \rho \times L \times I \times \cos\theta)}{A}$$



$$= \frac{(\sqrt{3} \times 2,65 \times 10^{-8} \times 250 \times 54,4 \times 0,85)}{1 \times 10^{-5}}$$

$$V_d = 53,06 \text{ Volt}$$

$$V_r = 210 - 53,06 = 156,94 \text{ Volt}$$

$$V_d(\%) = \frac{210 - 156,94}{210} \times 100\% = 25,26 \%$$

- b. Hasil perhitungan setelah dilakukan perencanaan uprating TIC 2x10 mm² menjadi TIC 3x70+1x50 mm²

$$V_d = \frac{(\sqrt{3} \times \rho \times L \times I \times \cos\theta)}{A}$$

$$= \frac{(\sqrt{3} \times 2,65 \times 10^{-8} \times 250 \times 54,4 \times 0,85)}{7 \times 10^{-5}}$$

$$V_d = 7,58 \text{ Volt}$$

$$V_r = 210 - 7,58 = 202,42 \text{ Volt}$$

$$V_d(\%) = \frac{210 - 202,42}{210} \times 100\% = 3,61 \%$$

- c. Resistansi pada TIC 3x70+1x50mm² panjang saluran 1750 meter pada jaringan existing

$$R = \rho \frac{L}{A} = 2,65 \times 10^{-8} \times \frac{1750}{7 \times 10^{-5}} = 0,6625 \Omega$$

- d. Resistansi pada TIC 2x10 mm² panjang saluran 250 meter pada jaringan existing

$$R = \rho \frac{L}{A} = 2,65 \times 10^{-8} \times \frac{250}{1 \times 10^{-5}} = 0,6625 \Omega$$

- e. Resistansi pada TIC 3x70+1x50mm² panjang saluran 250 meter pada jaringan setelah Uprating

$$R = \rho \frac{L}{A} = 2,65 \times 10^{-8} \times \frac{250}{7 \times 10^{-5}} = 0,0946 \Omega$$

- f. Power loss pada existing TIC 3x70+1x50mm² sepanjang 1750 meter dengan daya sebesar 79,07 kVA maka :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos\phi} = \frac{79,07 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 0,85} = 134,26 \text{ A}$$

$$P_{Loss} = V \cdot I = I^2 \cdot R = (134,26^2) \times 0,6622 = 11943,15 \text{ W} = 11,94 \text{ kW}$$

- g. Power loss pada existing TIC 2x10 mm² sepanjang 250 meter dengan daya sebesar 12,62 kVA dan didapat Total P_{Loss} Existing adalah :

$$I = \frac{P}{V \times \cos\phi} = \frac{12,62 \text{ kVA}}{220 \text{ V} \times 0,85} = 67,48 \text{ A}$$

$$P_{Loss} = V \cdot I = I^2 \cdot R = (67,48^2) \times 0,6622 = 3017,32 \text{ W} = 3 \text{ kW}$$

$$\text{Total } P_{Loss} = 11,94 + 3 = 14,94 \text{ kW}$$

- h. Power loss pada existing TIC 3x70+1x50mm² sepanjang 250 meter dengan daya sebesar 12,62 kVA, didapat Total P_{Loss} Uprating adalah :

$$I = \frac{P}{V \times \cos\phi} = \frac{12,62 \text{ kVA}}{220 \text{ V} \times 0,85} = 67,48 \text{ A}$$

$$P_{Loss} = V \cdot I = I^2 \cdot R = (67,48^2) \times 0,0946 = 431,04 \text{ W} = 0,43 \text{ kW}$$

$$\text{Total } P_{Loss} = 11,94 + 0,43 = 12,37 \text{ kW}$$

Tabel 4.1 Hasil Perbandingan Nilai Tegangan Jatuh



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Jatuh Tegangan Pada Jaringan <i>Existing</i>		Jatuh Tegangan Setelah Jaringan <i>Uprating</i>	
Perhitungan	Simulasi ETAP	Perhitungan	Simulasi ETAP
156,94 V	178 V	202,24 V	204
25,26 %		3,61 %	

Tabel 4.2 Hasil Perbandingan Nilai Rugi-Rugi

<i>Losses</i> Pada Jaringan <i>Existing</i>		<i>Losses</i> Setelah Jaringan <i>Uprating</i>	
Perhitungan	Simulasi ETAP	Perhitungan	Simulasi ETAP
14,94 kW	13,9 kW	12,37 kW	12,5 kW

Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 menyajikan hasil evaluasi kinerja jaringan listrik sebelum (*existing*) dan setelah peningkatan kapasitas (*uprating*), dengan membandingkan nilai tegangan jatuh dan rugi-rugi daya menggunakan dua metode: perhitungan manual dan simulasi ETAP. Pada Tabel 4.1, terlihat bahwa sebelum *uprating*, jatuh tegangan mencapai 156,94 V atau 25,26% dari tegangan nominal, yang menunjukkan kondisi jaringan yang kurang optimal karena drop tegangan melebihi batas wajar (biasanya maksimal 5-10%). Setelah *uprating*, jatuh tegangan turun signifikan menjadi 202,24 V atau hanya 3,61%, mendekati kondisi ideal. Simulasi ETAP memberikan hasil yang konsisten, yaitu 178 V untuk kondisi *existing* dan 204 V setelah *uprating*, mengindikasikan validitas model simulasi.

Tabel 4.2 memperlihatkan pengurangan *losses* daya akibat *uprating*. Sebelumnya, *losses* mencapai 14,94 kW (perhitungan) dan 13,9 kW (simulasi), menandakan kehilangan energi yang cukup besar. Setelah *uprating*, *losses* berkurang menjadi 12,37 kW (perhitungan) dan 12,5 kW (simulasi). Penurunan ini menunjukkan efisiensi jaringan meningkat, mengurangi pemborosan energi dan biaya operasional. Perbedaan antara hasil perhitungan dan simulasi ETAP relatif kecil, membuktikan bahwa kedua metode saling melengkapi dan dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan sistem distribusi. Secara keseluruhan, *uprating* jaringan berhasil meningkatkan kualitas tegangan dan mengurangi *losses*, sehingga meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem distribusi listrik.

5. Kesimpulan

Analisis menunjukkan *uprating* konduktor dari TIC 2×10 mm² menjadi TIC 3×70+1×50 mm² berhasil menurunkan jatuh tegangan dari 25,26% menjadi 3,61% dan mengurangi *losses* dari 14,94 kW menjadi 12,37 kW. Resistansi segmen kritis berkurang signifikan dari 0,6625 Ω menjadi 0,0946 Ω. Tegangan minimum meningkat dari 180 V menjadi 203-204 V, memenuhi standar SPLN (198-231 V). Simulasi ETAP konsisten dengan perhitungan manual, dengan selisih minimal. Peningkatan ini meningkatkan efisiensi sistem dan keandalan pasokan listrik, meskipun kombinasi dengan penyeimbangan beban diperlukan untuk optimalisasi lebih lanjut.

DAFTAR REFERENSI

- [1]. Anwar, M. R., Hafid, A., & Faharuddin, A. (2024). Analisis Drop Tegangan Pada Gardu Distribusi Jaringan Tegangan Rendah (JTR) PT. PLN (PERSERO) ULP KAREBOSI. *Arus Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(2), 222-233.
- [2]. Anisah, S., Tharo, Z., & Suhardi, S. (2019, May). ANALISIS PERBAIKAN TEGANGAN UJUNG PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20 KV DENGAN SIMULASI E-TAP (STUDI KASUS PT PLN (PERSERO) RAYON



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

- KUALA. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)* (Vol. 2, No. 1, pp. 208-213).
- [3]. Finawan, A., & Fauziah, A. (2024). Analisis Perbaikan Profile Tegangan pada Jaringan Distribusi 20 KV Sistem Radial. *Journal Serambi Engineering*, 9(2).
- [4]. Hutasoit, R. E., Tharo, Z., & Wibowo, P. (2019). Analisa keandalan sistem jaringan distribusi 20 KV PT. PLN (Persero) rayon delitua berbasis matlab.
- [5]. Pamungkas, B. S., Tarigan, A. D., & Fahreza, M. (2024). Analisis Penurunan Jatuh Tegangan dan Losses akibat Sambungan Deret dengan Penambahan Jaringan Tegangan Rendah serta Rekonfigurasi Sambungan Rumah. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(2), 8676-8690.
- [6]. Pratama, R. B., Wibowo, P. ., & Anisah, S. . (2025). Analisis Pengaruh Penggantian Konduktor pada Saluran Udara Tegangan Menengah 20kV terhadap Drop Tegangan di PT. PLN (Persero) UP3 Bangkinang. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 5(2), 803–812. <https://doi.org/10.54082/jupin.1361>
- [7]. Pratama, M. R., Wibowo, P., & Tarigani, A. P. (2025). Analysis of Insulation Resistance Testing During Biennial Maintenance of 20 kV Incoming Cubicle Circuit Breakers at Gunung Megang Substation, PT PLN (Persero) ULTG Prabumulih UPT Baturaja. *Fidelity : Jurnal Teknik Elektro*, 7(1), 22-32. <https://doi.org/10.52005/fidelity.v7i1.281>
- [8]. Rahmaniar, R., Wibowo, P., & Meliala, P. M. B. (2022, August). Transient Stability Analysis With Critical Clearing Time Method On Transmission Line 150 KV. In *Proceeding International Conference Keputeraan Prof. H. Kadirun Yahya* (Vol. 1, No. 1, pp. 138-150).
- [9]. Tharo, Z., Tarigan, A. D., Anisah, S., & Yuda, K. T. (2020, September). Penggunaan Kapasitor Bank Sebagai Solusi Drop Tegangan Pada Jaringan 20 Kv. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)* (Vol. 3, No. 1, pp. 82-86).
- [10]. Wibowo, P., Parlin Siagian, & Abdul Razak. (2025). Analisis Performansi Kabel N2XY Terhadap Jatuh Tegangan Pada Sistem Tiga Fasa Menggunakan Etap dan Monitoring Real-time Berbasis IoT. *Jurnal Komputer Teknologi Informasi Sistem Informasi (JUKTISI)*, 4(2), 1432–1439. <https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.681>