

ANALYSIS OF POWER LOSSES OF 20 KV MEDIUM VOLTAGE NETWORK SINGKAWANG KOTA AERA USING DIGSILENT POWERFACTORY 15.1.7

Herlian¹, M. Iqbal Arsyad², Zainal Abidin³

herlianlian7@gmail.com¹, iqbal.arsyad@ee.untan.ac.id², zainal.abidin@teknik.untan.ac.id³

Universitas Tanjungpura

ABSTRACT

Salah satu tantangan utama dalam pendistribusian energi listrik adalah terjadinya susut daya akibat panjangnya jaringan dan jauhnya beban dari sumber. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis susut daya yang terjadi pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) 20 kV di area Singkawang Kota serta mengevaluasi strategi perbaikan untuk meminimalkan susut tersebut. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory 15.1.7. Data yang digunakan mencakup 12 penyulang. Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan susut daya secara konsisten pada setiap skenario. Susut daya awal pada kondisi eksisting sebesar 760,12 kW. Setelah dilakukan Upaya perbaikan 1 (rekonfigurasi jaringan), susut menurun menjadi 738,17 kW. Upaya perbaikan 2 (pembesaran luas penampang) menurunkan susut lebih lanjut menjadi 674,63 kW. Penurunan terbesar terjadi setelah dilakukan upaya perbaikan 3 (penambahan penyulang express), yaitu menjadi 596,57 kW. Hasil ini membuktikan bahwa upaya perbaikan yang tepat dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi energi pada jaringan distribusi tegangan menengah.

Kata Kunci: Susut Daya, Jaringan Tegangan Menengah, Digsilent Powerfactory, Optimasi Jaringan, Efisiensi Energi

ABSTRACT

One of the main challenges in electricity distribution is power losses caused by the long network distances and the remoteness of loads from the source. This study aims to analyze power losses occurring in the 20 kV Medium Voltage Distribution Network (JTM) in the Singkawang City area and to evaluate improvement strategies to minimize such losses. The study uses DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 software. The data includes 12 feeders. The results show a consistent reduction in power losses in each scenario. Initial losses in the existing condition amounted to 760.12 kW. After implementing Improvement Effort 1 (network reconfiguration), the losses decreased to 738.17 kW. Improvement Effort 2 (conductor cross-sectional area enlargement) further reduced losses to 674.63 kW. The largest reduction occurred after implementing Improvement Effort 3 (addition of express feeder), resulting in losses of 596.57 kW. These results demonstrate that appropriate improvement measures can significantly enhance energy efficiency in medium voltage distribution networks.

Keywords: Power Losses, Medium Voltage Network, Digsilent Powerfactory, Network Optimization, Energy Efficiency

PENDAHULUAN

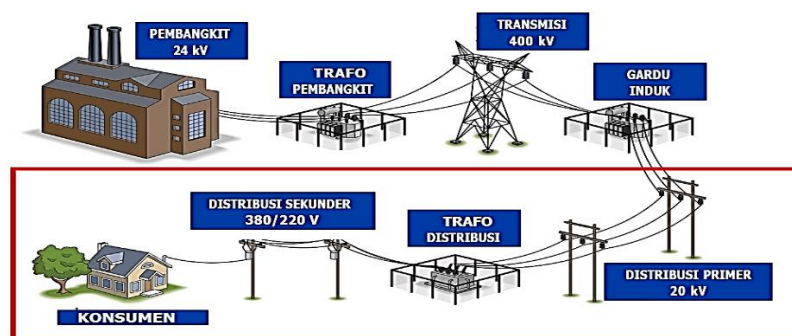
Tujuan utama dari sistem tenaga listrik ini adalah mengusahakan penyediaan dan pengiriman tenaga listrik yang tetap memperhatikan mutu serta keandalan (Albaroka & Widodo, 2017). Pada kenyataan di lapangan, penyaluran tenaga listrik terdapat kendala yang mungkin dapat terjadi, yaitu salah satunya adanya susut daya (losses). Susut daya pada sistem distribusi tenaga listrik dapat mempengaruhi mutu dan keandalan pada sistem, dimana susut daya dihasilkan oleh arus yang mengalir melalui penghantar. Pada 2024, target realisasi susut jaringan mencapai 8,58%, yang lebih baik dari acuan minimum (India)

sebesar 20%, tetapi masih jauh untuk mencapai acuan maksimum (USA) yaitu 6,20%. Hal ini mengindikasikan kebutuhan untuk terus meningkatkan efisiensi guna mendekati nilai optimal. Prognosis Realisasi Tahun 2024 menggunakan ketentuan batas atas dalam penetapan realisasi susut jaringan tenaga listrik tahunan sesuai Peraturan Menteri ESDM Nomor 9 Tahun 2020 (Direktorat Jendral Ketenagalistrikan, 2024). Masalah susut adalah masalah efisiensi pendistribusian tenaga listrik yang berkaitan langsung dengan manajemen pembebanan sistem tenaga listrik, yang mana harus dilakukan evaluasi dan pengendalian sampai pada batas yang wajar secara terus-menerus berkesinambungan (PT PLN (Persero), 2007). Usaha meminimalkan susut daya (losses) sistem distribusi tenaga listrik telah menjadi persoalan penting dalam dekade terakhir. Dari seluruh komponen sistem tenaga listrik, sistem distribusi merupakan komponen yang mempunyai kerugian terbesar. Sebagai contoh, berdasarkan audit energi hingga tahun 2004, angka kerugian energi total PLN se-Indonesia adalah 16,84%. Dari total kerugian energi listrik tersebut, kerugian sistem distribusi tercatat memiliki kerugian terbesar yaitu 14,47%, sedangkan kerugian sistem transmisi hanya 2,37%. Oleh karena itu dalam penelitian ini dibahas upaya menekan kerugian energi listrik yang terdapat pada sistem distribusi, karena memiliki kerugian jaring paling besar dalam sistem tenaga listrik (Syahputra, 2021). Dengan jumlah gardu distribusi sebanyak 455 buah dan pelanggan tegangan menengah sebanyak 21 buah, yang juga menjadi faktor timbulnya susut daya yang terjadi pada Jaringan Tegangan Menengah (JTM) area Singkawang Kota. Untuk mengetahui seberapa baik keandalan pengiriman daya pada jaringan tegangan menengah area Singkawang Kota, maka perlu adanya perhitungan susut daya terlebih dahulu agar komposisi susut daya dapat dengan mudah diketahui apakah masih dalam besaran yang ideal, atau di luar batas standar. Perhitungan ini sangat penting agar program perbaikan dapat berjalan efektif dan berdampak besar terhadap penekanan susut tersebut (Syukri dkk., 2024).

METODE PENELITIAN

1. Sistem Tenaga Listrik

Secara umum, sistem diartikan sebagai suatu kesatuan yang terdiri beberapa komponen atau elemen yang dihubungkan untuk memudahkan aliran informasi, materi atau energi untuk mencapai suatu tujuan. Dengan demikian, sebuah sistem pasti terdiri dari beberapa komponen penyusun yang dihubungkan sedemikian rupa sehingga dapat bekerja sesuai perannya masing-masing untuk mencapai tujuan tertentu, bila dikaitkan dengan tenaga listrik, maka yang akan mengalir dalam sistem itu adalah tenaga listrik (Suripto, 2017).



Gambar 1 Skema sistem tenaga listrik

2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik adalah tahap dalam sistem tenaga listrik yang

bertanggung jawab untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber produsen ke konsumen. Fungsi utama sistem distribusi adalah mengatur tegangan listrik, yang dilakukan melalui penggunaan transformator untuk menyesuaikan tegangan transmisi sesuai kebutuhan. Sistem distribusi ini memainkan peran penting dalam memastikan tenaga listrik dapat mencapai berbagai wilayah dan digunakan secara efisien oleh pengguna akhir. Tujuan dari setiap sistem distribusi adalah untuk menyampaikan daya ke beban dengan aman dan ekonomis (**Corio dkk., t.t.**).

Dalam definisi secara umum, sistem distribusi adalah bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara sumber daya besar (*bulk power source*, BPS) dan peralatan hubung pelanggan (*customers service switches*). Berdasarkan definisi ini maka sistem distribusi meliputi komponen-komponen berikut:

1. Sistem subtransmisi
2. Gardu induk distribusi
3. Penyulang distribusi atau penyulang primer
4. Transformator distribusi
5. Untai sekunder
6. Pelayanan pelanggan (*service drops*)

Akan tetapi, beberapa teknisi sistem distribusi lebih suka mendefinisikan sistem distribusi sebagai bagian dari sistem perlengkapan elektrik antara gardu induk dan pelanggan (**Syahputra, 2021**).

3. Komponen Jaringan Distribusi

1. Tiang

Tiang merupakan bagian jaringan distribusi tegangan menengah yang berfungsi sebagai penopang / penyangga penghantar. Tiang listrik harus memiliki daya mekanis yang tinggi sehingga dapat menahan beban tarikan penghantar atau terpaan angin. Berdasarkan bahannya, tiang listrik dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu tiang kayu, tiang besi dan tiang beton (**PT PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan D.I Yogyakarta, 2008**).

2. Isolator

Isolator memiliki fungsi utama yaitu sebagai penyekat listrik pada penghantar terhadap penghantar lainnya, dan penghantar terhadap tanah. Kontruksi isolator pada umumnya dibuat dengan bentuk lekukan-lekukan yang bertujuan untuk memperjauh jarak rambat, sehingga pada kondisi hujan maka ada bagian permukaan isolator yang tidak di tempeli air hujan (**PT PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan D.I Yogyakarta, 2008**).

3. Penghantar

Penghantar berfungsi untuk menghantarkan arus listrik. Penghantar untuk saluran udara biasanya disebut kawat yaitu penghantar tanpa isolasi, sedangkan untuk saluran dalam tanah, atau saluran udara berisolasi biasanya disebut dengan kabel (**PT PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan D.I Yogyakarta, 2008**).

Kawat penghantar yang digunakan dalam jaringan distribusi tenaga listrik umumnya dipilih dari logam yang memiliki konduktivitas tinggi, kekuatan tarik (*tensile strength*) yang besar, serta berat jenis yang rendah. Selain itu, logam yang digunakan sebaiknya tahan terhadap proses kimia dan perubahan suhu, serta memiliki titik cair yang tinggi.

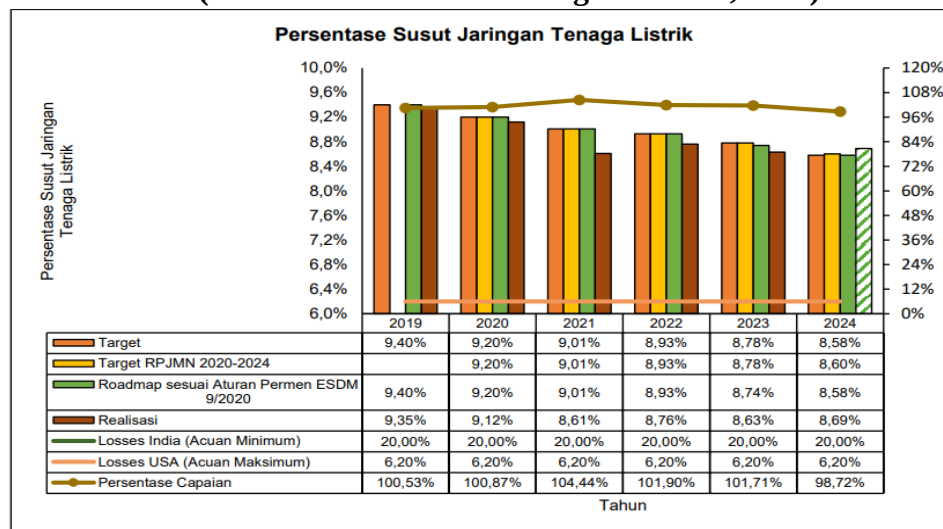
Untuk memenuhi syarat tersebut, kawat penghantar biasanya terbuat dari logam campuran (*alloy*), yaitu perpaduan beberapa jenis logam yang dijadikan satu material. Logam campuran yang umum digunakan dalam jaringan distribusi listrik adalah kawat tembaga campuran (*copper alloy*) dan kawat aluminium campuran (*aluminum alloy*) (**Amin & Mustaqim, 2022**).

4. Transformator

Transformator atau biasa disebut trafo merupakan komponen jaringan tegangan rendah yang berfungsi untuk mentransformasikan tegangan listrik. Energi listrik tegangan menengah 20 kV diturunkan menjadi 380/220 V oleh transformator distribusi.

Susut Jaringan Tenaga Listrik

Susut jaringan tenaga listrik merupakan salah satu indikator utama dalam mengukur efisiensi sistem distribusi dan transmisi listrik. Indikator ini digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian realisasi susut jaringan dengan target yang telah ditetapkan, sehingga dapat diketahui tren perubahan susut jaringan dari tahun ke tahun. Susut jaringan terjadi akibat perbedaan antara energi listrik yang disalurkan dengan energi listrik yang sampai ke pelanggan, setelah dikurangi energi untuk operasional jaringan itu sendiri. Faktor penyebab susut jaringan dikategorikan menjadi susut teknis dan susut non-teknis. Susut teknis terjadi akibat karakteristik material jaringan serta arus listrik yang mengalir dalam sistem tegangan tinggi, menengah, dan rendah. Semakin besar beban listrik yang digunakan oleh pelanggan pada jaringan yang sama, semakin besar pula susut teknis yang terjadi. Sementara itu, susut non-teknis disebabkan oleh faktor di luar aspek teknis, seperti pencurian listrik atau kesalahan administrasi (**Direktorat Jendral Ketenagakistrian, 2024**).



Gambar 1 Target, Realisasi, dan Persentase Capaian dari Persentase Susut Jaringan Tenaga Listrik

Analisis rugi daya pada sistem distribusi tenaga listrik merupakan evaluasi terhadap kehilangan energi yang terjadi selama proses penyaluran. Beberapa aspek yang dianalisis meliputi (**Corio dkk., t.t.**):

- Penyebab Rugi Daya: Rugi daya disebabkan oleh panas yang dihasilkan akibat hambatan dalam kabel dan peralatan distribusi, serta komponen lainnya seperti transformator dan *switch*.
- Kondisi Sebelum dan Sesudah: Analisis dapat melibatkan perbandingan kondisi rugi daya dan jatuh tegangan sebelum dan sesudah perbaikan atau rekonfigurasi jaringan distribusi.
- Perhitungan Rugi Daya: Penghitungan rugi daya pada objek sistem distribusi melibatkan analisis menggunakan data kelistrikan dan parameter teknis lainnya.
- Upaya Mengatasi Rugi Daya: Penelitian juga fokus pada cara mengatasi rugi daya, seperti rekonfigurasi jaringan untuk meningkatkan efisiensi.

Perhitungan Susut Daya pada Jaringan Tegangan Menengah

Susut daya karena arus beban dalam konduktor fase tunggal dan tiga fase yang setara adalah (**Gonen, t.t.**)

$$P_{LS.1\phi} = 2 \times I_{1\phi}^2 \times R$$

Dan

$$P_{LS.3\phi} = 3 \times I_{3\phi}^2 \times R$$

Dengan persen daya yang hilang dari suatu rangkaian dapat dinyatakan sebagai **(Gonen, t.t.)**:

$$\%I^2R = \left(\frac{P_{LS}}{P_r} \right) \times 100$$

Dimana:

P_{LS} adalah susut daya, kW

I , adalah arus yang mengalir pada konduktor, A

R , adalah resistansi atau hambatan, Ohm

P_r , adalah daya yang dihantarkan, kW

Bersumber dari (Komari, Pedoman Perhitungan Susut Teknis Jaringan, Lokakarya XI Pembakuan PLN 1992), maka susut teknis JTM 3 fasa dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S_{(watt)} = I_1^2 \cdot R_1 + (I_2^2)R_2 + (I_3^2)R_3 + (I_4^2)R_4 + (I_5^2)R_5$$

$$S_{(kWh)3fasa} = 3 \times \sum_1^n n^2 \times I^2 \times R \times LsF \times F_{kor} \times 10^{-3} kWh$$

Sedangkan energi yang masuk ke penyulang dapat dirumuskan **(Gonen, t.t.; PT PLN (Persero), 2007)** :

$$E_{(kWh)} = V \times I_{pp} \times \sqrt{3} \times PF \times LsF \times t (kWh)$$

Selanjutnya, apabila energi yang masuk ke penyulang utama dalam satu bulan diketahui maka arus puncak (I_{pp}) dapat dihitung:

$$I_{pp} = \frac{E_{(kWh)}}{\sqrt{3} \times V_{pp} \times PF \times LsF \times 720} (kWh)$$

Dimana:

I_{pp} = Arus puncak (peak) pangkal penyulang

n = Jumlah 'titik beban' (diberi tanda petik, karena mungkin bukan titik beban yang sesungguhnya) karena diasumsikan jarak antar titik beban adalah L

L = Jarak gawang antar titik beban = L_{total} penyulang / n (km)

R_{total} = Resistan total penghantar = $R_{konduktor}$ (ohm/km x L)

R = Resistan penghantar antar titik beban = R_{total} / n

I = Faktor kepadatan beban = I_{pp} / n (Amp/km)

LsF = Faktor susut (*loss factor*)

t = Kurun waktu (bila sebulan = 720 jam)

F_{kor} = Faktor koreksi akibat ketidakseimbangan, ketidakmerataan beban, faktor resistansi, temperatur, dan lain-lain.

PF = Faktor daya ($\cos \phi$)

V_{pp} = Tegangan fasa-fasa

Atau dapat juga dicari dengan rumus **(PLN, 2017)**:

$$P_{LS.JTM} = 3 \times \left(\frac{P_{ek}}{\sqrt{3} \times V_{tm}} \right)^2 \times \left(\frac{R}{1000} \right) \times L_{jtm} \times FK_{JTM} \times LLF_{JTM}$$

Dimana:

P_{ek} = Rata-rata daya semu per penyulang (kVA)

L_{JTM} = Rata-rata panjang penyulang (kms)

LLF_{JTM} atau LSF adalah faktor susut

$FK_{JTM} = F_{LL}$ = Faktor Kerja JTM

Ekuivalen tahunan biaya energi karena kerugian I^2R pada konduktor dapat dinyatakan sebagai berikut (**Gonen, t.t.**):

$$AEC = 3 \times I^2 R \times EC \times F_{LL} \times F_{LSA} \times 8760, \left[\frac{\$}{mi} \right]$$

Dengan:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{LL}}, [A]$$

dan

$$R = \frac{R_{ohm}}{km} \times L, [ohm]$$

atau

$$R = \frac{\rho \times L}{A}, [ohm]$$

dimana:

AEC adalah biaya energi tahunan yang setara dengan biaya energi akibat kerugian I^2R pada konduktor penyulang, \$/mi

EC adalah biaya energi, \$/kWh

F_{LL} adalah faktor lokasi beban

F_{LS} adalah faktor kerugian

F_{LSA} adalah faktor penyisihan kerugian

ρ adalah tahanan jenis, $[ohm \cdot m]$

L adalah panjang penghantar yang digunakan, [m]

A adalah luas penampang penghantar yang digunakan, $[m^2]$

Faktor kerugian dapat didefinisikan sebagai rasio susut daya tahunan rata-rata terhadap susut daya tahunan puncak dan dapat ditemukan dengan asumsi untuk daerah perkotaan (**Gonen, t.t.**):

$$F_{LS} = 0.3F_{LD} + 0.7F_{LD}^2$$

dan untuk daerah pedesaan:

$$F_{LS} = 0.16F_{LD} + 0.84F_{LD}^2$$

dimana:

F_{LS} adalah faktor rugi-rugi, [p.u]

F_{LD} adalah faktor beban, [p.u]

Faktor penyisihan kerugian adalah faktor alokasi yang memungkinkan untuk kerugian tambahan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik total akibat transmisi daya dari pembangkit ke gardu-gardu induk distribusi (**Gonen, t.t.**).

DIgSILENT PowerFactory

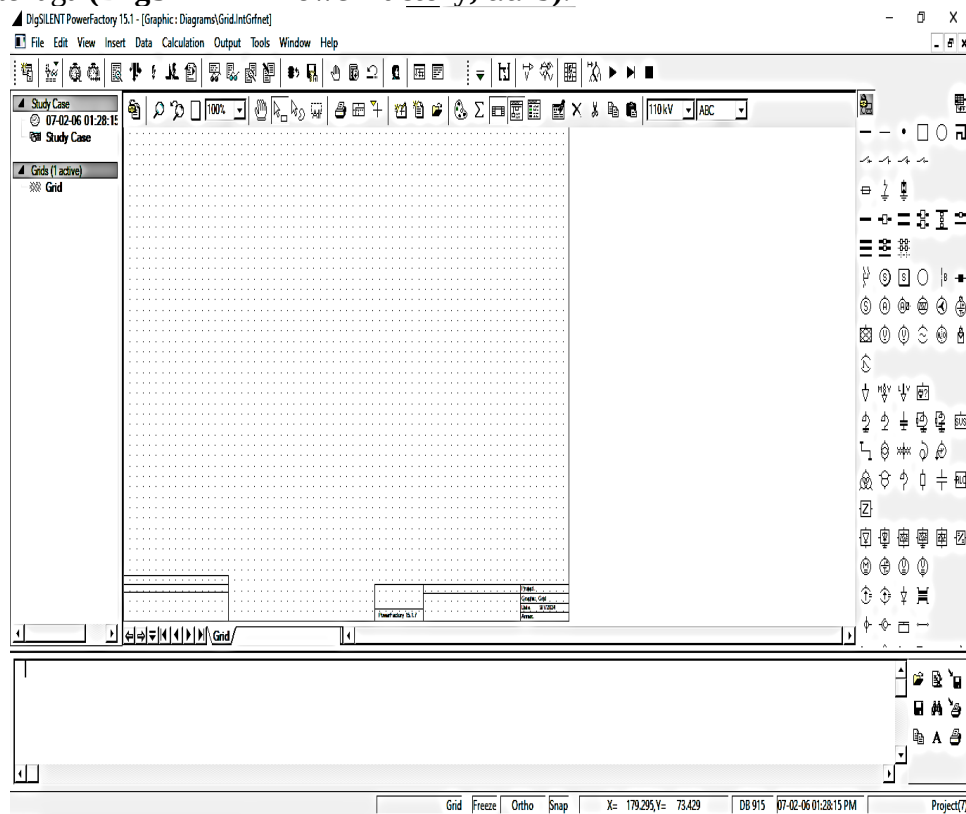
Bersumber dari website resmi *DIgSILENT PowerFactory* dijelaskan bahwa, program perhitungan *DIgSILENT PowerFactory*, adalah *software* rekayasa yang berguna untuk analisis industri, utilitas, dan analisis sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini telah dirancang sebagai paket perangkat lunak canggih yang terintegrasi dan interaktif yang didedikasikan untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol dalam rangka mencapai tujuan utama perencanaan dan optimasi operasi.

DIgSILENT Nama singkatan dari "*Digital Simulation and Electrical NeTwork calculation program*". *DIgSILENT* adalah perangkat lunak analisis sistem tenaga yang

pertama di dunia yang terintegrasi dengan grafis antar muka satu baris, diagram satu baris interaktif. juga termasuk fungsi menggambarkan. kemampuan mengedit dan semua relevan statis dan dinamis fitur perhitungan.

DIgSILENT PowerFactory menawarkan berbagai metode perhitungan aliran beban, termasuk teknik *AC Newton-Raphson* penuh (seimbang dan tidak seimbang). Algoritme yang diterapkan menunjukkan stabilitas dan konvergensi yang sangat baik. Beberapa tingkat iterasi menjamin konvergensi dalam semua kondisi, dengan relaksasi otomatis opsional dan modifikasi batasan.

DIgSILENT Power Factory dirancang dan dikembangkan oleh para insinyur berkualitas dan *programmer* dengan pengalaman bertahun-tahun di kedua bidang analisis sistem tenaga listrik dan bidang pemrograman. Akurasi dan validitas dari hasil yang diperoleh dengan perangkat lunak ini telah dikonfirmasi dalam sejumlah besar dan diimplementasi oleh organisasi-organisasi yang terlibat dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga (**DIgSILENT PowerFactory, t.t.-b**).



Gambar 2 Tampilan Awal Dari Aplikasi Digsilent

Dalam rangka memenuhi kebutuhan analisis sistem kekuasaan saat ini, kekuatan sistem paket perhitungan *DIgSILENT* dirancang sebagai alat rekayasa terpadu yang menyediakan teknik lengkap "walk around" melalui semua fungsi yang tersedia, bukannya sekumpulan modul perangkat lunak yang berbeda.

Dengan menggunakan hanya satu data base, yang berisi semua data yang dibutuhkan untuk semua peralatan dalam sistem tenaga (misalnya data busbar, Data Generator, data proteksi, *harmonic* data, data controller), *PowerFactory* dapat dengan mudah mengeksekusi salah satu atau semua fungsi yang tersedia, semua dalam lingkup program yang sama. Beberapa fungsi yang tersedia dalam *DIgSILENT PowerFactory* adalah analisis aliran beban/loadflow analisis, perhitungan arus pendek/short-circuit calculation, analisis harmonik/harmonic analisis, koordinasi proteksi/protection coordination, dan stabilitas/stability calculation (**DIgSILENT PowerFactory, t.t.-b**).

Tie Open Point Optimization (TOPO)

PowerFactory menawarkan serangkaian alat yang lengkap untuk analisis dan optimalisasi jaringan distribusi, dengan fokus khusus pada pembangkitan energi terdistribusi dan beban tegangan rendah. Serangkaian fungsi pengoptimalan ditawarkan untuk memungkinkan kemampuan dan konfigurasi jaringan yang akan dioptimalkan (**DIgSILENT PowerFactory, t.t.-a**). *Tie Open Point Optimization (TOPO)* merupakan salah satu fitur pada aplikasi *DIgSILENT* yang dapat menghitung dan menentukan pola operasi sistem distribusi dengan menggunakan metode *cross section* atau perpindah beban penyulang satu ke penyulang lainnya. Istilah yang sering digunakan adalah manuver beban. Fitur TOPO ini dapat memberikan informasi kondisi LBS/Recloser yang lebih optimal, misalnya LBS A yang sebelumnya berada pada posisi NO (*Normally Open*) sebaiknya menggunakan NC (*Normally Close*) (**PLN UP3 Manokwari, 2019**).

Hasil yang didapat saat menggunakan fitur TOPO pada aplikasi *DIgSILENT* sebagai berikut (**DIgSILENT PowerFactory, t.t.-a**):

- Optimalisasi posisi titik buka ikatan dengan memperhatikan minimalisasi kerugian, peningkatan keandalan sistem, atau minimalisasi tindakan pengalihan.
- Dukungan sistem seimbang/tidak seimbang.
- Optimalisasi simultan dari satu atau beberapa skenario dan periode waktu.
- Batasan aliran cabang dan batas, tegangan absolut, dan kendala penurunan/kenaikan tegangan.
- Fitur pelaporan yang ditingkatkan dan visualisasi grafis, termasuk identifikasi otomatis titik buka ikatan.
- Berbagai metodologi, seperti heuristik eksplorasi mesh, algoritma genetik, dan simulasi *annealing*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Eksisting

Dari hasil simulasi bentuk JTM Singkawang Kota menggunakan aplikasi *DIgSILENT PowerFactory*, dapat diketahui bahwa panjang keseluruhan dari JTM Singkawang Kota adalah 338,8930 km

Tabel 1 Hasil Desain Simulasi DIgSILENT

Penyulang	Jarak Beban Terjauh [km]	Jarak Total [km]	Resistansi Total [Ohm]	Jumlah Trafo	Jumlah Pelanggan TM
ALIANYANG	5,724	9,908	3,0038	26	2
ANTASARI	5,217	6,812	1,8484	11	1
BORNEO	26,629	69,068	30,2098	74	8
DIPONEGORO	5,633	10,808	3,6183	37	3
GM SITUT	4,598	9,736	3,6400	40	0
GRANDMALL	9,742	10,362	2,7706	4	1
KARTINI	8,522	18,187	7,2376	29	0
SETAPUK	30,955	78,889	35,0641	80	3
SIAGA	11,696	17,78	6,7821	30	1
SUDIRMAN	28,488	50,989	20,2461	30	1
SUHADA	9,137	12,151	3,5391	18	0
TANI	20,342	44,203	15,4974	76	1
TOTAL		338,893	133,4573	455	21

Tabel 2 Hasil Perhitungan Aliran Daya Tiap Penyulang Menggunakan

Penyulang	Daya [KVA]	Daya [kW]	Susut Daya [kW]	Susut Daya [%]	Tegangan Minimum [p.u.]	Jatuh Tegangan [%]
SUDIRMAN	3327,604	3116,3490	199,3550	6,3971	0,9080	9,2004
BORNEO	4454,259	4153,0380	135,4747	3,2621	0,9418	5,8224
SETAPUK	4597,531	4330,8120	93,4810	2,1585	0,9605	3,9452
SIAGA	3027,479	2858,6090	45,1038	1,5778	0,9721	2,7903
TANI	5065,418	5040,6800	155,7172	3,0892	0,9790	2,0976
DIPONEGORO	3351,26	3157,1590	34,3252	1,0872	0,9823	1,7653
GM SITUT	3305,864	3122,6230	28,9030	0,9256	0,9831	1,6916
SUHADA	1237,306	1165,4310	14,1852	1,2172	0,9834	1,6632
KARTINI	2406,399	2272,4440	20,1024	0,8846	0,9847	1,5331
GRANDMALL	1335,807	1263,4260	8,7093	0,6893	0,9868	1,3201
ALIANYANG	2580,911	2437,0760	17,0875	0,7011	0,9881	1,1880
ANTASARI	1171,621	1105,0660	7,6730	0,6943	0,9890	1,1000
TOTAL	36180,85	34022,713	760,1173	2,2341	0,9080	9,2004

Berdasarkan tabel 2 dapat diketahui bahwa total susut daya yang terjadi pada JTM Singkawang Kota adalah sebesar 760,1173 kW dengan daya input dari GI sebesar 34.022,71 kW, atau dalam persentase susut daya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{susut daya} = \frac{P_{LS}}{P_r} \times 100\%$$

$$\text{susut daya} = \frac{760,1173}{34.022,713} \times 100\%$$

$$= \mathbf{2,2341\%}$$

Jadi besar susut daya JTM Singkawang Kota hasil simulasi Aplikasi DIgSILENT PowerFactory adalah sebesar 760,1173 kW atau sebesar 2,2341%, akan tetapi jatuh tegangan yang terjadi pada jaringan ini masih melebihi batas yang telah ditentukan menurut SPLN No.72 Tahun 1987 yaitu 5%. Dimana pada penyulang Borneo dan penyulang Sudirman jatuh tegangan yang terjadi pada penyulang tersebut sebesar 5,8224% dan 9,2004%.

Upaya Perbaikan 1

Pada penggunaan aplikasi DIgSILENT terdapat fitur untuk melakukan rekonfigurasi jaringan secara otomatis yaitu dengan menggunakan fitur Tie Open Point Optimization (TOPO), yaitu fitur ini dapat mengatur LBS dan SSO terbuka atau tertutup secara otomatis yang membuat beban penyulang menjadi berpindah ke penyulang satu dengan lainnya, sehingga mendapatkan susut yang lebih kecil dari simulasi awalnya. Hasil perhitungan Tie Open Point Optimization atau TOPO pada aplikasi DIgSILENT sangat bagus untuk diimplementasikan karena dapat menurunkan susut dan tidak membutuhkan biaya dalam pelaksanaannya.

Tabel 3 Ringkasan Hasil Simulasi Rekonfigurasi Jaringan Menggunakan Fitur TOPO DIgSILENT PowerFactory

Penyulang	Daya [KVA]	Daya [kW]	Susut Daya [kW]	Susut Daya [%]	Tegangan Minimum [p.u.]	Jatuh Tegangan [%]
SUDIRMAN	3327,604	3116,349	199,355	6,397068	0,9080	9,200418
BORNEO	4049,035	3775,885	110,2672	2,9203	0,9473	5,272076
KARTINI	4364,491	4115,247	63,97765	1,554649	0,9682	3,180356
SIAGA	3027,479	2858,609	45,10376	1,577822	0,9721	2,790318
TANI	5443,372	5416,949	180,0412	3,323664	0,9770	2,295675
SETAPUK	2099,679	1976,616	23,68916	1,19847	0,9795	2,046203
ANTASARI	2263,96	2131,473	22,50036	1,055625	0,9820	1,80039
SUHADA	1237,306	1165,431	14,18519	1,217163	0,9834	1,663153

Penyulang	Daya [KVA]	Daya [kW]	Susut Daya [kW]	Susut Daya [%]	Tegangan Minimum [p,u,]	Jatuh Tegangan [%]
GM SITUT	3217,459	3039,668	27,4277	0,9023257	0,9834	1,657448
GRANDMALL	1335,807	1263,426	8,709328	0,6893422	0,9868	1,320116
DIPONEGORO	2380,996	2243,803	21,05656	0,9384316	0,9872	1,280674
ALIANYANG	3070,877	2897,305	21,85218	0,7542245	0,9876	1,236517
TOTAL	36163,81	34000,761	738,16529	2,171025	0,9080	9,200418

Dari tabel 3 dapat dilihat bahwa susut daya yang terjadi setelah dilakukan rekonfigurasi jaringan berkurang menjadi 738,16529 kW atau 2,171025 % dimana susut mengalami penurunan yang artinya upaya perbaikan ini dapat dikatakan berhasil dalam upaya mengurangi susut daya. Akan tetapi untuk jatuh tegangan yang terjadi pada penyulang Borneo dan penyulang Sudirman ditemukan jatuh tegangan yang melebihi standar yang diizinkan, dimana pada penyulang tersebut jatuh tegangan yang terjadi adalah sebesar 5,2721% dan 9,2004% yang mana ini masih belum memenuhi standar yang diizinkan oleh SPLN No.72 Tahun 1987 yaitu jatuh tegangan sebesar 5%, sehingga perlu dilakukan upaya perbaikan lebih lanjut agar dapat mengurangi susut dan dapat meningkatkan efisiensi jaringan distribusi.

Upaya Perbaikan 2

Simulasi ini dilakukan dengan cara memperbesar penampang yang ada pada jaringan eksisting dimana dengan cara memperbesar penampang maka resistansi yang dihasilkan pada jaringan menjadi berkurang, sehingga dengan berkurangnya resistansi ini maka susut daya dapat berkurang dikarenakan susut daya berbanding lurus dengan arus dan resistansi jaringan sesuai dengan rumus $P_{LS}=I^2 R$.

Tabel 4 Hasil Perhitungan Aliran Daya Tiap Penyulang setelah Dilakukan Pembesaran Luas Penampang

Name	Daya [KVA]	Daya [kW]	Susut daya [kW]	Susut Daya [%]	Tegangan Minimum [p,u,]	Jatuh Tegangan [%]
SUDIRMAN	3294,664	3066,4010	149,4069	4,8724	0,9214	7,8620
BORNEO	4453,53	4151,8340	134,2714	3,2340	0,9420	5,7961
SETAPUK	4580,618	4303,4650	66,1338	1,5368	0,9690	3,0981
SIAGA	3027,124	2858,0550	44,5499	1,5588	0,9726	2,7395
TANI	5054,782	5035,3340	150,3706	2,9863	0,9787	2,1325
DIPONEGORO	3351,212	3157,0800	34,2461	1,0847	0,9823	1,7653
SUHADA	1237,285	1165,3950	14,1497	1,2142	0,9834	1,6614
GM SITUT	3305,302	3121,7260	28,0060	0,8971	0,9835	1,6527
KARTINI	2406,356	2272,3720	20,0309	0,8815	0,9847	1,5331
GRANDMALL	1335,807	1263,4260	8,7093	0,6893	0,9868	1,3201
ALIANYANG	2580,907	2437,0710	17,0819	0,7009	0,9881	1,1880
ANTASARI	1171,62	1105,0640	7,6709	0,6942	0,9890	1,1000
TOTAL	36122,99	33937,2230	674,6275	1,9879	0,9214	7,8620

Dengan memperbesar luas penampang akan menghasilkan nilai resistansi yang kecil sesuai dengan rumus $R=(\rho \times L)/A$, dimana dalam rumus ini diketahui bahwa luas penampang berbanding terbalik dengan besar resistansi yang dihasilkan sehingga nilai resistansi akan mengecil seiring diperbesarnya luas penampang yang digunakan pada penghantar.

Dari Tabel 4 dapat kita lihat bawah simulasi perbaikan yang telah dilakukan mengalami penurunan susut daya yang lumayan tinggi menjadi 647,6275 kW (1,9879%), selain susut daya jatuh tegangan juga mengalami penurunan dimana jatuh tegangan tertinggi berkurang menjadi 7,8620% pada penyulang Sudirman. Akan tetapi nilai yang didapat masih melebihi standar yang diizinkan, dimana nilai jatuh tegangan yang terjadi masih melebihi standar yang diizinkan oleh SPLN No.72 Tahun 1987 yang mana terdapat jatuh

tegangan yang masih berada pada batas yang diizinkan yaitu 5% yang terjadi pada penyulang Sudirman dan penyulang Borneo.

Upaya Perbaikan 3

Untuk menentukan penyulang mana yang akan diperbaiki dengan menambah penyulang express kita harus terlebih dahulu mengetahui besar susut daya, jatuh tegangan yang terjadi, dan juga bentuk aliran daya dengan melihat hasil simulasi yang dibuat pada aplikasi DlgSILENT.

Dari beberapa simulasi yang dilakukan terdapat penyulang yang tidak memenuhi standar yang ditentukan yaitu SPLN No.72 Tahun 1987 yang mana jatuh tegangan sebesar yang diizinkan maksimal 5%. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan Penyulang Sudirman dan Penyulang Borneo yang belum memenuhi standar yang diizinkan. Dimana simulasi yang terakhir akan dilakukan adalah dengan cara menambah Penyulang Express yang akan membantu mensuplai beban yang ada pada penyulang tersebut. Dimana untuk Penyulang Sudirman akan di bantu suplai dari GI Singkawang sedangkan Penyulang Borneo akan dibantu suplai dari Exim Pasir Panjang.

Tabel 5 Hasil Perhitungan Aliran Daya Tiap Penyulang setelah Dilakukan Penambahan Penyulang Express

Name	Daya [KVA]	Daya [kW]	Susut daya [kW]	Susut Daya [%]	Tegangan Minimum [p,u,]	Jatuh Tegangan [%]
ALIANYANG	3070,861	2897,3000	21,8521	0,7542	0,9876	1,2365
ANTASARI	2263,941	2131,4650	22,5001	1,0556	0,9820	1,8003
BORNEO	3057,652	2870,4750	56,6609	1,9739	0,9656	3,4444
DIPONEGORO	2380,985	2243,7990	21,0565	0,9384	0,9872	1,2806
EXPRESS	2043,377	1937,4380	94,6384	4,8847	0,9650	3,4987
GM SITUT	3217,433	3039,6570	27,4274	0,9023	0,9834	1,6573
GRANDMALL	1335,806	1263,4250	8,7093	0,6893	0,9868	1,3201
KARTINI	4364,384	4115,1900	63,9749	1,5546	0,9682	3,1800
SETAPUK	2099,66	1976,6070	23,6889	1,1985	0,9795	2,0461
SIAGA	2087,61	1975,1370	21,8409	1,1058	0,9818	1,8202
SINJUN	1328,179	1235,0100	31,3558	2,5389	0,9654	3,4571
SUDIRMAN	2096,053	1967,2450	32,9856	1,6767	0,9702	2,9841
SUHADA	1237,29	1165,4240	14,1850	1,2172	0,9834	1,6630
TANI	5065,093	5040,3290	155,6911	3,0889	0,9790	2,0969
TOTAL	35968,31	33858,5010	596,5667	1,7619	0,9650	3,4987

Dari tabel 5 dapat dilihat bahwa susut daya mengalami penurunan yang signifikan dimana susut daya yang terjadi pada upaya ini sebesar 596,5667%. Selain itu jatuh tegangan yang terjadi juga sudah sesuai dengan standar yang diizinkan yaitu SPLN No.72 tahun 1987, yaitu 5% dikarenakan tidak ditemukan nilai jatuh tegangan yang melebihi 5 %. Oleh karena itu dapat dikatakan upaya perbaikan untuk skenario ini dapat dikatakan berhasil dikarenakan dapat menurunkan susut daya cukup besar dari skenario perbaikan uang lainnya, selain itu juga dapat menurunkan nilai jatuh tegangan yang terjadi pada jaringan ini.

Perbandingan Hasil Sebelum dan Sesudah Dilakukan Upaya Perbaikan

Tabel 6 Perbandingan Hasil Sebelum dan Sesudah Dilakukan Perbaikan

Penyulang	Eksisting		Rekonfigurasi		Pembesaran Penampang		Penyulang Express	
	Susut Daya [kW]	Jatuh Tegangan [%]	Susut Daya [kW]	Jatuh Tegangan [%]	Susut Daya [kW]	Jatuh Tegangan [%]	Susut Daya [kW]	Jatuh Tegangan [%]
ALIANYANG	17,0875	1,1880	21,8522	1,2365	17,0819	1,1880	21,8521	1,2365
ANTASARI	7,6730	1,1000	22,5004	1,8004	7,6709	1,1000	22,5001	1,8003
BORNEO	135,4747	5,8224	110,2672	5,2721	134,2714	5,7961	56,6609	3,4444
DIPONEGORO	34,3252	1,7653	21,0566	1,2807	34,2461	1,7653	21,0565	1,2806
EXPRESS							94,6384	3,4987
GM SITUT	28,9030	1,6916	27,4277	1,6574	28,0060	1,6527	27,4274	1,6573
GRANDMALL	8,7093	1,3201	8,7093	1,3201	8,7093	1,3201	8,7093	1,3201

Penyulang	Eksisting		Rekonfigurasi		Pembesaran Penampang		Penyulang Express	
	Susut Daya [kW]	Jatuh Tegangan [%]	Susut Daya [kW]	Jatuh Tegangan [%]	Susut Daya [kW]	Jatuh Tegangan [%]	Susut Daya [kW]	Jatuh Tegangan [%]
KARTINI	20,1024	1,5331	63,9777	3,1804	20,0309	1,5331	63,9749	3,1800
SETAPUK	93,4810	3,9452	23,6892	2,0462	66,1338	3,0981	23,6889	2,0461
SIAGA	45,1038	2,7903	45,1038	2,7903	44,5499	2,7395	21,8409	1,8202
SINJUN							31,3558	3,4571
SUDIRMAN	199,3550	9,2004	199,3550	9,2004	149,4069	7,8620	32,9856	2,9841
SUHADA	14,1852	1,6632	14,1852	1,6632	14,1497	1,6614	14,1850	1,6630
TANI	155,7172	2,0976	180,0412	2,2957	150,3706	2,1325	155,6911	2,0969
TOTAL	760,1173	9,2004	738,1653	9,2004	674,6275	7,8620	596,5667	3,4987

Secara keseluruhan, seluruh metode evaluasi memberikan hasil yang sejalan dalam menggambarkan tren penurunan susut daya dan penurunan jatuh tegangan pada setiap skenario perbaikan. Hasil ini menunjukkan bahwa upaya perbaikan seperti rekonfigurasi jaringan, pembesaran penampang konduktor, dan penerapan penyulang express terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik akan tetapi dari seluruh skenario, penambahan penyulang express memberikan hasil terbaik dengan total susut daya sistem sebesar 596,5667 kW dan jatuh tegangan maksimum hanya 3,4987%, jauh di bawah batas maksimum SPLN. Hal ini menunjukkan peningkatan efisiensi sistem secara menyeluruh, baik dari sisi teknis maupun operasional. Dengan demikian, skenario penyulang express merupakan opsi paling efektif dalam upaya meningkatkan efisiensi dan keandalan

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi dan analisis teknis terhadap sistem distribusi tenaga listrik dengan empat skenario pengembangan jaringan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kondisi sistem distribusi pada saat ini (eksisting) mengalami susut daya sebesar 760,1173 kW atau 2,2341% dari total daya yang disalurkan. Namun demikian, jatuh tegangan pada beberapa penyulang, khususnya penyulang Sudirman (9,2004%), melebihi batas toleransi 5% sebagaimana ditetapkan dalam SPLN No. 72 Tahun 1987, sehingga perlu dilakukan upaya perbaikan.
2. Skenario upaya perbaikan 1 (rekonfigurasi jaringan) menghasilkan penurunan susut daya menjadi 738,1653 kW (2,1710%), namun belum mampu menurunkan jatuh tegangan secara merata, dengan nilai tertinggi tetap berada di atas standar, yaitu 9,2004% pada penyulang Sudirman.
3. Skenario upaya perbaikan 2 (pembesaran luas penampang) menghasilkan perbaikan lebih lanjut, dengan susut daya turun menjadi 674,6275 kW (1,9879%). Namun demikian, jatuh tegangan tertinggi masih berada pada penyulang Sudirman sebesar 7,8620%, yang masih melampaui batas SPLN.
4. Skenario upaya perbaikan 3 (penambahan penyulang express) memberikan hasil paling optimal. Nilai susut daya menurun signifikan menjadi 596,5667 kW (1,7619%), dan jatuh tegangan maksimum turun menjadi 3,4987%, sepenuhnya memenuhi standar jatuh tegangan SPLN No. 72 Tahun 1987 yaitu maksimal 5%.

Dengan mengacu pada standar yang diizinkan dan upaya dalam mengurangi susut daya yang terjadi, maka dapat disimpulkan bahwa skenario penyulang express merupakan solusi paling efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik, baik dari sisi rugi daya maupun kualitas tegangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Albaroka, G., & Widodo, G. (2017). Analisis Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Penyulang Barata Jaya Area Surabaya Selatan Menggunakan Software Etap 12. *Jurnal Teknik Elektro*, 6(02), 105–110.
- Amin, M., & Mustaqim, B. (2022). *Distribusi Sistem Tenaga Listrik* (M. Amin & B. Mustaqim, Ed.);

- 1 ed.). TEKNOSAIN.
- Corio, D., Maulana, R., Yunesti, P., Hendri, Z., Rauf, R., Baqaruzi, S., Wahyu Pratama, R., & Tri Laksono, D. (t.t.). Perencanaan dan Operasi Sistem Tenaga Listrik.
- DIGSILENT PowerFactory. (t.t.-a). Distribution Network Tools. <https://www.digsilent.de/en/distribution-network-tools.html>.
- DIGSILENT PowerFactory. (t.t.-b). PowerFactory. <https://www.digsilent.de/en/>.
- Direktorat Jendral Ketenagalistrikan. (2024). Laporan Kinerja Tahun 2024.
- Gonen, T. (t.t.). Electric Power Distribution Engineering (3 ed.).
- PLN. (2017). Formula Perhitungan Susut (DC-FY) Peran & Dampak Terhadap Operasional PLN.
- PLN UP3 Manokwari. (2019). Pengaturan Pola Operasi Sistem Distribusi Untuk Menurunkan Susut Teknis.
- PT PLN (Persero). (2007). Pengendalian Susut.
- PT PLN (Persero) Distribusi Jawa Tengah dan D.I Yogyakarta. (2008). Buku Pedoman Standar Kontruksi Jaringan Distribusi Tahun 2008.
- Suripto, S. (2017). Sistem Tenaga Listrik (S. Suripto, Ed.; 1 ed.). LP3M UMY.
- Syahputra, R. (2021). Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik (R. Syahputra, Ed.).
- Syukri, Muliadi, & Akbar, A. (2024). Analisa Perhitungan Susut Teknis Di PT. PLN (Persero) Rayon Singkil. Jurnal Elektrikal, 16(1), 20–29. <https://doi.org/10.26623/elektrika.v16i1.8854>