

Analysis of Voltage Drop Recovery On 20 kV Primary Distribution Line

Analisis Perbaikan Jatuh Tegangan pada Penyulang Distribusi Primer 20 kV

Lewi F. Simarmata, Glanny M. C. Mangindaan, Lily S. Patras

Dept. of Electrical Engineering, Sam Ratulangi University Manado, Kampus Bahu St., 95115, Indonesia
e-mails : lewisimarmata023@student.unsrat.ac.id, glanny_m@unsrat.ac.id, patraslily48@gmail.com

Received: 07 September 2023; revised: 10 November 2023; accepted: 07 January 2024

Abstract — Biak District is currently experiencing a period of development of long-term infrastructure development which includes the construction of tourism, industry, manufacturing, to the construction of national housing spread across Biak Regency. So that the forecasting of large electrical loads in the next ten years in 2033 will rise to 23.21%, so that the value of the voltage drop in 2033 precisely at the Karbos feeder reaches 25.85% with the received voltage at the end of the line reaches 6,299 kV. As for karmar feeders, the voltage drop value in 2033 can reach 11.9% with the receiving voltage at the end of the line reaching 14,087 kV. It is necessary to make improvements with the addition of power capacitors on the main line of the line so that the voltage profile in 2033 can be in accordance with the permitted PLN standards. The capacitor that needs to be added to the carbos feeder is 500 kVAR and the karmar feeder capacitor is added by 150 kVAR. After the addition of Power Capacitors, The Voltage value received at the end of the line becomes 19.31 KV at Karbos feeders and 19.25 kV at Karmar feeders, so that the voltage profile at Karbos and Karmar feeders in 2033 is in accordance with the permissible PLN standards.

Key words — Forecasting Load; Power Capacitors; Voltage Drop; Voltage Profile.

Abstrak — Kabupaten Biak saat ini sedang mengalami masa pengembangan pembangunan infrastruktur jangka panjang yang meliputi pembangunan pariwisata, industri, pabrikaan, hingga pembangunan perumahan nasional yang tersebar di Kabupaten Biak. Sehingga perkiraan besar beban listrik dalam sepuluh tahun ke depan yaitu pada tahun 2033 akan naik mencapai 23.21%, sehingga besar nilai jatuh tegangan pada tahun 2033 tepatnya di penyulang Karbos mencapai 25.85% dengan tegangan terima pada ujung saluran mencapai 6.299 kV. Sedangkan untuk penyulang Karmar nilai jatuh tegangan pada tahun 2033 dapat mencapai 11.9% dengan tegangan terima pada ujung saluran mencapai 14.087 kV. Maka perlu dilakukan perbaikan dengan penambahan kapasitor daya pada jalur utama saluran agar profil tegangan pada tahun 2033 dapat sesuai dengan standar PLN yang diizinkan. Kapasitor yang perlu ditambahkan pada penyulang Karbos sebesar 500 kVAR dan pada penyulang Karmar kapasitor yang ditambahkan sebesar 150 kVAR. Setelah penambahan kapasitor daya didapatkan nilai tegangan yang diterima pada ujung saluran menjadi 19.31 kV pada penyulang Karbos dan 19.25 kV pada penyulang Karmar, sehingga profil tegangan pada penyulang Karbos dan Karmar pada tahun 2033 telah sesuai dengan standar PLN yang diizinkan.

Kata kunci — Jatuh Tegangan; Kapasitor Daya; Perkiraan Beban; Profil Tegangan.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik sangat penting dalam kehidupan manusia setiap hari. Mengingat energi listrik merupakan sumber energi utama yang paling dibutuhkan dan dimanfaatkan oleh manusia untuk memenuhi kebutuhan hidup sehari – hari, sehingga dapat dipastikan kebutuhan beban pada sistem tenaga listrik akan selalu bertambah dari tahun ke tahun. Oleh karena itu suatu sistem tenaga listrik harus dapat melayani konsumen secara maksimal dari segi kualitas maupun kontinuitas.

Sistem distribusi primer 20 kV di PT. PLN (Persero) ULP Biak Kota memiliki konfigurasi jaringan distribusi pola radial, sehingga permasalahan yang sering dijumpai pada penyulang sistem distribusi di ULP Biak Kota yaitu kualitas daya listrik yang memburuk, hal ini diakibatkan karena sering terjadinya masalah jatuh tegangan sistem yang cenderung besar, sehingga jatuh tegangan yang terjadi kurang dari standar toleransi. Jatuh tegangan merupakan peristiwa di mana hilangnya besar nilai tegangan pada suatu penyaluran daya listrik yang diakibatkan karena panjang saluran dan diameter penghantar yang digunakan sehingga membuat impedansinya akan terus bertambah besar. Standar yang digunakan yaitu untuk *over voltage* +5 % dan untuk *under voltage* -10%. [1] Sebagian penyulang di ULP Biak Kota mempunyai jatuh tegangan melebihi standar toleransi, sehingga harus dilakukan perbaikan jatuh tegangan. Terdapat sepuluh penyulang pada ULP Biak Kota.

Perbaikan jatuh tegangan pada penyulang di Kabupaten Biak akan dilakukan dengan metode penambahan kapasitor daya agar dapat memperbaiki nilai jatuh tegangan agar sesuai dengan standar yang ada. Kapasitor daya ini juga sangat tepat untuk menjaga kualitas daya listrik di Biak Kota berdasarkan kenaikan beban listrik dari tahun ke tahun. Untuk itu sebelum diterapkan penggunaan kapasitor daya, perlu dilakukan analisa terlebih dahulu untuk menentukan penggunaan kapasitor daya secara optimal, yang di dalamnya berisi penentuan lokasi pemasangan kapasitor daya yang tepat, ukuran dari kapasitor daya, dan jumlah unit kapasitor yang akan dibutuhkan pada penyulang di ULP Biak Kota pada tahun 2033.

A. Penelitian Terkait

Menurut Syufrijal (2014) Sistem distribusi merupakan bagian sistem terpenting dalam penyaluran tenaga listrik yang berhubungan langsung dengan pelanggan. Terdapat dua sistem distribusi yaitu distribusi primer dan distribusi sekunder [2].

Menurut Niken (2016) Distribusi primer yaitu pendistribusian energi listrik yang dimana tegangannya terlebih dahulu diturunkan menjadi 20 kV pada gardu induk dan kemudian dikirim ke gardu distribusi pada sisi pelanggan, atau dari gardu induk tenaga listrik langsung dikirimkan kepada konsumen – konsumen yang sangat besar, sedangkan distribusi sekunder, pendistribusian energi listrik dimulai dari sisi sekunder trafo distribusi (trafo 20 kV pelanggan) ke konsumen tegangan rendah.[3]

a) Distribusi Primer

Distribusi primer adalah jaringan penyaluran energi listrik yang memiliki nilai tegangan menengah (20 kV). Jaringan distribusi primer ini dapat juga disebut jaringan penyulang. Jaringan distribusi primer dimulai dari sisi belitan sekunder trafo daya yang terpasang pada gardu induk kemudian disalurkan sampai ke sisi belitan primer trafo distribusi yang berada pada *tower* saluran. Terdapat lima jenis konfigurasi pada sistem distribusi yaitu pola radial, sistem *loop*, sistem *spindel*, sistem *spot network* dan sistem interkoneksi. [4]

b) Distribusi Sekunder

Distribusi sekunder adalah jaringan penyaluran energi listrik yang termasuk bagian dengan kategori tegangan rendah, tegangan sistem pada jaringan distribusi ini sebesar 380/220 kV. Jaringan distribusi sekunder berawal dari belitan sekunder trafo distribusi sampai ke alat ukur (meteran) pelanggan. Jaringan distribusi sekunder penyalurannya menggunakan penghantar yang berisolasi.[2]

B. Perkiraan Beban Listrik

Perkiraan beban listrik merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan perencanaan operasi sistem tenaga listrik pada beberapa tahun yang akan datang. Dalam memperkirakan suatu beban dimasa yang akan datang, tidak ada rumus yang akurat yang digunakan dikarenakan besar beban ditentukan oleh para konsumen energi listrik yang setiap waktu memerlukan atau menggunakan energi listrik. Secara umum kebutuhan daya listrik konsumen bersifat periodik, maka grafik pemakaian beban listrik atau yang sering disebut grafik beban mempunyai sifat periodik.

Teknik perkiraan atau peramalan beban adalah suatu cara untuk dapat mengetahui besar daya listrik yang dibutuhkan pada masa yang akan datang melalui suatu mekanisme yang sudah ditetapkan. Data-data beban pada tahun sebelumnya sangat diperlukan dalam perhitungan perkiraan beban yang akan terjadi di masa yang akan datang serta dilakukan dengan cara mengekstrapolir grafik beban dimasa lampau ke masa yang akan datang. Setelah dilakukan ekstrapolasi kemudian ditambah koreksi-koreksi terhadap hal-hal khusus baik untuk perkiraan jangka pendek, jangka menengah maupun jangka panjang.[5]

Dengan memilih metode perkiraan yang tepat diharapkan perkiraan akan mendekati keadaan yang tepat. Metode yang sering digunakan yaitu metode regresi linier. Untuk mengetahui benar atau tidak penggunaan metode regresi linier, maka terlebih dahulu ditentukan besar koefisiensi korelasi (r) yang diberikan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut. [6]

$$r = \frac{K \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{K \sum X^2 - (\sum X)^2 (K \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (1)$$

Dimana:

Y = Besar beban pada tahun tertentu

X = Tahun di mana besar beban adalah Y

K = Jumlah tahun

Untuk memperoleh harga koefisien regresi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$m = \frac{K \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{K \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2)$$

Untuk mencari harga konstanta regresi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$n = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{(K \sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (3)$$

Sedangkan untuk nilai metode regresi linier dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$Y = mX + n \quad (4)$$

C. Daya Energi Listrik

Dalam sistem tenaga listrik daya terbagi menjadi tiga yaitu daya aktif yang disimbolkan dengan P, daya reaktif yang disimbolkan dengan Q dan daya semu yang disimbolkan dengan S. Penjelasan dari ketiga daya tersebut sebagai berikut.[7]

1) Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya yang asli yang diperlukan pada konsumen atau beban yang disuplai. Satuan dari daya aktif ini adalah Watt. Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk mendapatkan besar daya aktif.[8]

- Daya aktif satu fasa:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (5)$$

- Daya aktif tiga fasa:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \quad (6)$$

2) Daya Reaktif

Daya reaktif adalah daya yang dipakai untuk menghasilkan medan magnet. Daya aktif ini memiliki simbol Q, dengan satuannya adalah Var. Berikut merupakan persamaan yang dipakai untuk menghitung daya reaktif:

- Daya reaktif satu fasa:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (7)$$

- Daya reaktif tiga fasa:

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi \quad (8)$$

3) Daya Semu

Daya semu merupakan daya yang dibangkitkan oleh generator pada sistem pembangkit listrik atau daya yang dikirimkan oleh penyedia tenaga listrik. Daya semu ini memiliki simbol yaitu S dengan satuannya adalah VA (Volt Ampere). Di dalam daya semu terdiri daya aktif dan daya reaktif berdasarkan beban jenis beban yang dilayani.

Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung daya semu yaitu sebagai berikut:

$$S = V \times I \text{ (VoltAmpere)} \quad (9)$$

Nilai daya semu juga dapat diperoleh melalui persamaan berikut.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

D. Faktor Daya (Cos Θ)

Faktor daya adalah kosinus dari beda sudut fasa antara arus dan tegangan. Simbol dari faktor daya ini adalah $\cos \Theta$ dan mempunyai nilai yaitu dari 0 sampai 1. Factor daya dikatakan baik jika nilainya semakin mendekati 1.. Factor daya dapat dihitung dengan cara membandingkan nilai daya aktif (P) dengan nilai daya semu (S) seperti pada persamaan berikut.[9]

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \tag{11}$$

Faktor daya terdiri dari dua yaitu faktor daya terbelakang (*lagging*) dan faktor daya mendahului (*leading*). Faktor daya lagging ini dapat terjadi jika melayani beban bersifat induktif sedangkan leading jika beban yang dilayani bersifat kapasitif (*leading*).[7]

E. Penghantar Saluran Distribusi

1) Resistansi Saluran

Pada suatu sistem dengan arus bolak-balik, arus akan melewati bagian terluar penampang penghantar sehingga menimbulkan efek kulit atau yang disebut dengan *skin Effect*, sehingga dapat menyebabkan tahanan arus bolak-balik akan lebih besar dari tahanan arus searah. Tahanan arus searah ditentukan oleh nilai resistivitas material konduktor. Dengan mengetahui besar resistansi DC, dengan persamaan berikut.[10]

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{A} \tag{12}$$

Nilai resistansi arus searah bergantung pada temperatur, apabila rumus (12) dilakukan pada temperatur 20°C maka pada suhu lebih dari 20°C dapat menggunakan rumus sebagai berikut. [11]

$$R_{t_2} = R_{t_1} + (1 + \alpha_1(t_2 - t_1)) \tag{13}$$

R_{t_2} = Nilai resistansi sesudah suhu berubah (Ω)

R_{t_1} = Nilai resistansi sebelum suhu berubah (Ω)

α_0 = Koefisien temperatur

T_0 = Temperatur transisi bahan

(untuk tembaga, $T_0 = 238.5$ °C, sedangkan untuk aluminium, $T_0 = 228.1$ °C).

Δt = Perubahan temperatur ($t_2 - t_1$)

A = Luas Penampang (m^2)

l = Panjang konduktor (km)

ρ = Tahanan jenis penghantar ($\Omega mm^2 /m$)

(untuk tembaga, $\rho = 10.66 \Omega.cmil/ft$ atau $= 1.77 \times 10^{-8} \Omega.m$ sedangkan aluminium, $\rho = 17 \Omega.cmil/ft$ atau $= 2.83 \times 10^{-8} \Omega$).

Pengaruh kenaikan temperature terhadap resistansi dapat ditentukan dari persamaan sebagai berikut.

$$\frac{R_{t_2}}{R_{t_1}} = \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \tag{14}$$

Atau,

$$R_{t_2} = R_{t_1} \times \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \tag{15}$$

Sehingga untuk nilai resistansi AC dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$R_{AC} = K \times R_{DC} \tag{16}$$

Dimana:

R_{AC} = Resistansi AC (Ω/km)

R_{DC} = Resistansi DC (Ω/km)

K = Faktor Koreksi (1.02)

2) Reaktansi Induktif Saluran

Nilai induktansi dan reaktansi suatu penghantar sangat ditentukan oleh material, jarak dan bentuk konfigurasi jaring. Dalam konfigurasi jaring simetris dapat dimisalkan jarak antara masing-masing penghantar adalah sama. Maka, untuk mencari GMD pada konduktor tiga fasa dinyatakan dalam persamaan berikut.[12]

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12} \times D_{23} \times D_{13}} \tag{17}$$

Untuk mencari nilai GMR dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$GMR = \alpha \times \sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{18}$$

Nilai dari α dapat dilihat dalam Tabel I.[13]

Untuk menentukan induktansi setiap kawat penghantar dapat menggunakan persamaan seperti berikut.

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \tag{19}$$

Sehingga untuk mendapatkan nilai reaktansi kawat penghantar saluran dapat menggunakan persamaan berikut.[12]

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L \tag{20}$$

Dimana:

L = Induktansi (H/km)

X_L = reaktansi kawat penghantar (Ω/km)

GMR = *geometric mean radius* dari penghantar (mm)

GMD = *geometric mean distance* (mm)

3) Impedansi Saluran

Impedansi adalah total hambatan pada suatu sistem tenaga listrik dengan arus bolak-balik (AC). [7]

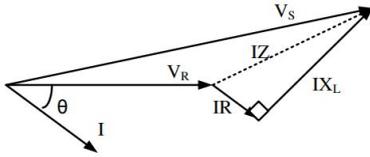
$$Z = R + jX \tag{21}$$

F. Jatuh Tegangan (Drop Voltage)

Jatuh tegangan merupakan berkurangnya besar nilai tegangan pada suatu penghantar yang digunakan. Jatuh tegangan pada suatu sistem akan semakin besar jika panjang penghantar dan beban yang dilayaninya semakin besar, namun jatuh tegangan ini juga dapat berkurang jika luas penampang penghantar yang digunakan lebih besar [2] Nilai jatuh tegangan dapat dinyatakan dalam persen atau dalam besaran Volt. Persamaan jatuh tegangan didapatkan dari diagram vektor arus dan tegangan pada saluran distribusi seperti yang terlihat pada gambar 1.[14]

TABEL I
FAKTOR KETERGANTUNGAN JUMLAH URAT KAWAT PENGHANTAR

Jumlah Kawat	Cu / Al		ACSR	
	Ag		Jumlah Kawat	ag
Solid	0,779		26	0,809
7	0,726		30	0,829
19	0,758		54	0,81
37	0,768			
61	0,772			
91	0,774			
127	0,775			



Gambar 1. Diagram Vektor Arus dan Tegangan Saluran Distribusi (sumber : Tampubolon, 2014)

$$V_S = V_R + IZ \quad (22)$$

$$V_S = V_R + (I \cos \theta - j I \sin \theta) \times (R + jX)$$

$$V_S = V_R + IR \cos \theta + jIX \cos \theta - jIR \sin \theta + IX \sin \theta$$

$$V_S = V_R + I(R \cos \theta + X \sin \theta) + jI(X \cos \theta - R \sin \theta)$$

$$\Delta V = V_S - V_R = I(R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (23)$$

Untuk sistem 3 fasa, maka persamaannya menjadi sebagai berikut : [9]

$$\Delta V_{3\theta} = \sqrt{3} \times I \times l \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (24)$$

Karena besar arus 3 fasa menjadi :

$$I_{3\theta} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos \theta} \quad (25)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka besar persentase jatuh tegangan pada saluran distribusi dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut. [14]

$$\%V_d = \frac{\Delta V}{V} \times 100\% \quad (26)$$

Dimana:

$\%V_d$ = Persentase Jatuh tegangan (%)

ΔV = Jatuh Tegangan (Volt)

R = Resistansi saluran (Ω/km)

X = Reaktansi saluran (Ω/km)

V = Tegangan yang disalurkan (Volt)

l = Panjang penghantar (km)

θ = Sudut faktor daya

G. Penambahan Kapasitor Daya

Penambahan kapasitor merupakan suatu cara alternatif yang digunakan untuk mengurangi nilai jatuh tegangan dengan menentukan berapa unit yang akan ditambahkan serta dalam menentukan lokasi yang optimum untuk ditambahkan sehingga diperoleh kualitas tegangan sesuai dengan standar yang diijinkan. Dengan penambahan kapasitor daya, daya reaktif akan disuplai kepada beban yang bersifat induktif sehingga kompensasi dari kapasitor akan mengurangi penyerapan daya reaktif pada sistem oleh beban [15], dengan alternatif itu jatuh tegangan yang terjadi dapat diperbaiki.

Perhitungan penentuan kebutuhan kapasitor dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut. [9]

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (27)$$

$$Q_c = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (28)$$

Sehingga untuk menentukan rumus kapasitansi kapasitor kapasitor dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$C = \frac{Q_c}{2\pi fV^2} \quad (29)$$

Dimana:

S = Daya semu (VA)

C = Kapasitansi kapasitor (F)

Q_1 = Daya reaktif sebelum penambahan kapasitor (VAR)

Q_2 = Daya reaktif setelah penambahan kapasitor (VAR)

Q_c = Kapasitas Kapasitor (VAR)

Perhitungan hubungan kenaikan tegangan yang terjadi sesuai standart PLN setelah pemasangan kapasitor dapat dilakukan dengan persamaan berikut ini. [14]

$$I_{Rise} = I_c \times X_c \quad (30)$$

$$I_c = \frac{Q_c}{V} \quad (31)$$

Dimana:

X_c = Reaktansi antara kapasitor dan sumber (Ω/km)

I_c = komponen arus reaktif *leading* (Ampere)

Penambahan kapasitor daya pada jaringan dapat dihubungkan secara seri maupun paralel untuk memperoleh nilai kualitas tegangan yang semakin baik. Kapasitor paralel bekerja dengan cara meningkatkan nilai faktor daya pada sistem sedangkan kapasitor seri bekerja secara langsung untuk mengurangi nilai resistansi induktif

a. Kapasitor seri

Kapasitor seri digunakan untuk perkembangan besar beban yang terjadi dikemudian hari, sehingga nilai dayanya lebih besar dari pada kapasitor paralel. Dengan penambahan kapasitor seri, nilai jatuh tegangan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut: [9]

$$\Delta V = IR \cos \theta + I(X_L - X_C) \sin \theta \quad (32)$$

Dimana:

R = Resistansi pada penyulang (Ω)

X_L = Reaktansi induktif penyulang (Ω)

X_C = Reaktansi Kapasitif dari kapasitor (Ω)

b. Kapasitor Paralel

Kapasitor paralel adalah kapasitor yang pemasangannya dihubungkan secara paralel dengan saluran dan banyak digunakan pada sistem distribusi. Kapasitor shunt memberikan daya reaktif sehingga arus yang dihasilkan oleh kapasitor dapat menentang komponen arus beban induktif, sehingga Nilai jatuh tegangan yang baru setelah penambahan kapasitor dapat diperoleh dari persamaan berikut: [16]

$$\Delta V_{3\theta} = I_R R + I_X X_L - I_C X_L \quad (33)$$

Dimana:

R = tahanan total dari sirkuit penyulang (Ω)

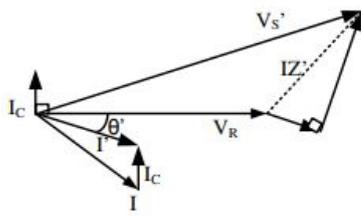
X_L = reaktansi induktif total dari penyulang (Ω)

I_R = komponen arus aktif (A)

I_X = komponen arus reaktif lagging (A)

I_C = komponen arus reaktif leading (A)

Persamaan jatuh tegangan setelah penambahan kapasitor *shunt* didapatkan dari diagram vektor arus dan tegangan pada saluran distribusi seperti yang terlihat pada gambar berikut.



Gambar 2. Diagram Pemasangan Kapasitor *Shunt* (sumber: Risjayanto, 2019)

Untuk nilai pendekatan dari persentase kenaikan tegangan tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.[17]

$$\%VR = \frac{Q_c \times X_L \times l}{10 \times (V_{L-L})^2} \tag{34}$$

Dimana:

%VR = Persentase kenaikan tegangan (%)

l = Panjang saluran dari sumber tegangan ke lokasi pemasangan kapasitor (kms)

V_{L-L} = Tegangan fasa - fasa (kV)

II. DATA TEKNIS DAN PERHITUNGAN

A. Kenaikan Pemakaian Energi Pada ULP Biak Kota

Kenaikan pemakaian total energi yang terjadi pada sistem kelistrikan pada ULP Biak Kota dari tahun 2017 sampai pada tahun 2023 dapat dilihat pada Tabel II. Pemakaian total energi yang terjadi memperlihatkan kenaikan yang linier. Data pada Tabel II akan digunakan untuk menganalisa perkiraan persentase kenaikan pemakaian total energi yang terjadi sepuluh tahun ke depan untuk mendapatkan besarnya nilai beban puncak yang terjadi di setiap seksi pada penyulang sistem kelistrikan ULP Biak Kota pada tahun 2033. Untuk perhitungan perkiraan beban akan dibahas pada bab II dan bab III.

B. Sistem Distribusi Primer 20 kV Pada ULP Biak Kota

Sistem jaringan distribusi primer yang ada di ULP Biak Kota adalah sistem distribusi secara langsung dengan konfigurasi sistem distribusi primer jenis radial dengan hantaran yang terbuka (*Overheads feeders*). Penyulang yang terdapat di Kabupaten Biak yang melayani area pelayanan PT. PLN (Persero) cabang Kota Biak pada tahun 2023 yang berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Karang Mulia dan Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) Urfu. Terdapat sepuluh penyulang jaringan distribusi primer pada ULP Biak Kota yang dapat dilihat pada Tabel III.

TABEL II

DATA PEMAKAIAN TOTAL ENERGI SISTEM KELISTRIKAN ULP BIAK KOTA

Tahun	Pemakaian Energi (kWh)
2017	248488134
2018	257352276
2019	267668532.3
2020	272416113
2021	280084631
2022	293921367
2023	308912876

TABEL III

PENYULANG SISTEM DISTRIBUSI PRIMER 20 KV ULP BIAK KOTA

No	Penyulang	Sistem	Panjang SUTM (kms)	Jumlah Gardu (unit)	Kapasitas Gardu (kVA)
1	Karrid	Biak	16.46	37	5.550
2	Karsum	Biak	13.00	30	4.285
3	Karmar	Biak	61.57	29	2.380
4	Karsor	Biak	19.78	40	7.170
5	Karbos	Biak	90.95	61	4.390
6	Karven 1	Biak	5.35	23	3.750
7	Karven 2	Biak	6.36	26	3.495
8	Karban	Biak	0.49	7	560
9	Karfi	Biak	4.85	4	500
10	Karsam	Biak	0.59	17	2.530

(Sumber: PT. PLN (Persero) Cabang Kota Biak, Januari 2023)

Dari data di atas didapatkan penyulang dengan jaringan terpanjang yaitu penyulang Karbos dan penyulang Karmar dengan panjang penyulang mencapai 90.95 kms dan 61.57 kms. Maka dalam penelitian ini akan difokuskan pada penyulang Karbos dan Karmar. Pada penyulang Karbos nilai arus beban yang paling besar mencapai 304.09 A sedangkan pada penyulang Karmar nilai arus beban yang paling besar mencapai 92.43 A . Data beban dan panjang penghantar pada penyulang Karbos dan Karmar dapat dilihat pada tabel IV dan tabel V.

TABEL IV

DATA BEBAN DAN PANJANG PENGHANTAR SUTM PENYULANG KARBOS

Seksi	Panjang Penghantar (kms)	Luas	
		Penampang dan Jenis Pengantar (mm ²)	Arus Beban (A)
Segmen cab “Karbos – Samping Lap PLTD” – LBS motorize Swapodibo	3.105	3x150 A3C	198.52
Segmen LBS motorize Swapedido – LBS TMP	1.995	3x150 A3C	95.94
Segmen LBS TMP – Kamp parai A3C / A3CS 150 mm	1.662	3x150 A3C	304.09
Kamp parai A3C / A3CS 150 mm – LBS Taman Burung	5.752	3x150 A3C	3.81
Segmen LBS Taman Burung – LBS motorize APMS	6.11	3x150 A3C	135.87
Segmen LBS motorize APMS – LBS Opiaref	4.261	3x150 A3C	60.98
Segmen cab “LBS opiaref – LBS kantor camat” – FCO jaringan marau	1.797	3x150 A3C	27.75
Segmen cab “FCO marau – Gardu RAW 305” – Gardu Desa Sawa BAR 301	3.372	3x150 A3C	52.79
Segmen Gardu Desa Sawa BAR 301 – Gardu BAR 303	2.599	3x150 A3C	29.54
Segmen Gardu BAR 303- Gardu TJB 301	4.507	3x150 A3C	25.56
Segmen Gardu TJB 301 – Pertigaan distrik Sawadori	2.667	3x150 A3C	1.86
Segmen Pertigaan distrik Sawadori – Pertigaan trafo sisipan	6.342	3x150 A3C	8.32
Segmen pertigaan trafo sisipan – Ujung Gardu SAU 301	2.392	3x150 A3C	9.62
Segmen Cab “Pertigaan Trafo Sisipan – Ujung Gardu SAU 301” – Ujung Gardu MAK 302	6.403	3x150 A3C	6.2

TABEL V

DATA BEBAN DAN PANJANG PENGHANTAR SUTM PENYULANG KARMAR

Seksi	Panjang Penghantar	Luas Penampang dan Jenis	Arus Beban
-------	--------------------	--------------------------	------------

	(kms)	Penghantar(mm ²)	(A)
Segmen Karmar-LBS Kios Putih	2.657	3x150 A3C	75.35
Segmen segitiga Yafdas-LBS ATB	2.493	3x150 A3C	61.41
Segmen Gereja Efrat Darfuar-Gardu SOR502	2.719	3x70 A3C	41.49
Segmen Cab."LBS Maryendi-Gardu SOR502"-LBS Wapoga	2.997	3x70 A3C	53.11
Segmen LBS Wapoga-Recloser Yendidori	1.277	3x70 A3C	65.06
Segmen Recloser Yendidori-Fai Adoki	4.841	3x150 A3C	92.43
Segmen Fai Adoki-Hutan Urfu	2.946	3x150 A3C	4.97
Segmen Hutan Urfu-FCO Urfu Pantai	3.564	3x150 A3C	34.52
Segmen Urfu Pantai-FCO Samber	6.365	3x150 A3C	3.44
Segmen FCO Samber-Gardu WRO501	2.833	3x150 A3C	13.94
Segmen Gardu WRO501-Gardu WRO502	5.820	3x150 A3C	0.14

(Sumber: PT. PLN (Persero) Cabang Kota Biak, Maret 2023)

C. Perkiraan Besar Beban Pada ULP Biak Kota

Untuk mengetahui berapa besar beban yang terjadi di penyulang distribusi ULP Biak Kota dalam sepuluh tahun kedepan, dilakukan perhitungan perkiraan pemakaian energi total di ULP Biak kota dengan menggunakan data pemakaian energi dalam beberapa tahun terakhir. Pemakaian total energi dapat dihitung dengan menggunakan metode regresi linier. Pada tabel VI di bawah, memperlihatkan suatu kenaikan pemakaian energi yang cenderung linier sehingga metode regresi linier sangat akurat dalam memperhitungkan pemakaian total energi di tahun 2033, sehingga dapat diketahui juga nilai beban di setiap seksi penyulang yang terjadi dalam sepuluh tahun di ULP Biak Kota.

TABEL VI
PEMAKAIAN TOTAL ENERGI DENGAN METODE REGRESI LINIER

Tahun	X	Y (kWh)	X ²	X.Y	Y ²
2017	1	2484881 34	1	248488134	6.174635273880196e+ 16
2018	2	2573522 76	4	514704552	6.623019396238018e+ 16
2019	3	2676685 32.3	9	803005596.9	7.164644318363614e+ 16
2020	4	2724161 13	16	1089664,452	7.421053862202877e+ 16
2021	5	2800846 31	25	1400423155	7.844740052240616e+ 16
2022	6	2939213 67	36	1763528202	8.638976997914869e+ 16
2023	7	3089128 76	49	2162390132	9.542716495859138e+ 16
	28	1928843 929.3	140	7982204223. 9	5.340978639669933e+ 17

Keterangan:

X = Tahun dimana besar beban adalah Y
Y = Besar beban pada tahun tertentu

$$r = \frac{K \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{K \sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{K \sum Y^2 - (\sum Y)^2}}$$

$$r = \frac{(7 \times 7982204223.9) - (28) \times (1928843929.3)}{\sqrt{((7 \times 140) - 784) \times ((7 \times 5.340978639669933e+17) - (3.720438903597463e+18))}}$$

$$r = \frac{1867799546.9}{\sqrt{(196) \times (1.82461441714901e+16)}}$$

$$r = \frac{1867799546.9}{\sqrt{(3.57624425761206e+18)}}$$

$$r = \frac{1867799546.9}{\sqrt{(3.57624425761206e+18)}}$$

$$r = \frac{1867799546.9}{1891096046.63}$$

$$r = 0.987$$

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan di atas, didapatkan hasil nilai korelasi r = 0.987 atau mendekati satu. Dari hasil nilai korelasi tersebut diketahui terdapat hubungan yang linier antara X dan Y, sehingga metode regresi linier dapat digunakan untuk menghitung besar pemakaian total energi yang akan terjadi dalam sepuluh tahun ke depan di ULP Biak Kota yaitu dari tahun 2024 sampai pada tahun 2033.

Untuk menghitung harga koefisien regresi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$m = \frac{K \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{K \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$m = \frac{(7 \times 7982204223.9) - (28) \times (1928843929.3)}{(7 \times 140) - (784)}$$

$$m = \frac{(55875429567.3) - (54007630020.4)}{196}$$

$$m = \frac{1867799546.9}{196}$$

$$m = 9529589.525$$

Kemudian dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (3) untuk mencari nilai harga konstanta regresi (n) sebagai berikut:

$$n = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{(K \sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$n = \frac{(1928843929.3 \times 140) - (28) \times (7982204223.9)}{(7 \times 140) - (784)}$$

$$n = \frac{(270038150102) - (223501718269.2)}{196}$$

$$n = \frac{465364318328}{196}$$

$$n = 237430774.65$$

Untuk mencari nilai dari metode regresi dapat memasukkan hasil perhitungan dari persamaan (2) dan (3) ke dalam persamaan (4) sebagai berikut.

$$Y = mX + n$$

$$Y = 9529589.525X + 237430774.65$$

D. Perhitungan Resistansi, Reaktansi dan Impedansi

Kualitas energi listrik yang sangat baik dalam suatu sistem distribusi yaitu mempunyai nilai jatuh tegangan yang sangat kecil. Perhitungan nilai jatuh tegangan dengan menggunakan

persamaan (28) dapat dilakukan jika telah diketahui nilai tahanan tahanan, GMD, GMR, reaktansi. Dalam saluran distribusi yang ada di ULP Biak Kota terutama pada penyulang Karbos dan Karmar menggunakan jenis konduktor dengan jenis AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*) dengan ukuran luas penampang 70 mm² dan 150 mm².

- Perhitungan Jenis Penghantar Pada Penyulang Karbos

Penulis hanya menampilkan perhitungan pada Segmen cab “Karbos – Samping Lap PLTD” – LBS motorize Swapodibo. Diketahui untuk nilai:

$$p = 2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$l = 3.105 \text{ kms}$$

$$A = 150 \text{ mm}^2 \rightarrow 150 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Sehingga besar nilai tahanan R_{t1} dapat dihitung menggunakan persamaan (12) seperti berikut.

$$R_{t1} = p \frac{l}{A}$$

$$R_{t1} = 2.83 \times 10^{-8} \frac{3.105}{150 \times 10^{-6}}$$

$$R_{t1} = 0.000585 \Omega / m \rightarrow 0.000585 \times 10^3$$

$$R_{t1} = 0.585 \Omega / km$$

Nilai R_{t1} akan digunakan untuk mencari besar nilai tahanan R_{t2} yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (15) seperti berikut.

$$R_{t2} = R_{t1} \times \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1}$$

$$R_{t2} = 0.585 \times \frac{(228.1) + 60}{(228.1) + 20}$$

$$R_{t2} = 0.585 \times 1.161$$

$$R_{t2} = 0.679 \Omega / km$$

Untuk mendapatkan nilai R_{AC} dihitung dengan persamaan (16) dengan faktor koreksi ($K=1.02$) sebagai berikut.

$$R_{AC} = K \times R_{t2}$$

$$R_{AC} = 1.02 \times 0.679$$

$$R_{AC} = 0.692 \Omega / km$$

Nilai reaktansi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.21). Untuk nilai konduktor jenis A3C dengan $A = 150 \text{ mm}^2$ memiliki jumlah kawat 37, sehingga untuk nilai $\alpha = 0,768$ dengan jarak antar konduktor yaitu ($D = 900 \text{ mm}$).

Dengan demikian untuk menghitung nilai GMD dan GMR dapat menggunakan persamaan (17) dan (18) sebagai berikut.

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12} \times D_{23} \times D_{13}}$$

$$GMD = \sqrt[3]{900 \times 900 \times 1800}$$

$$GMD = \sqrt[3]{1458000000}$$

$$GMD = 1134 \text{ mm} = 1.134 \text{ m}$$

$$GMR = \alpha \times \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$GMR = 0,768 \times \sqrt{\frac{150}{3.14}}$$

$$GMR = 0,768 \times 6.91$$

$$GMR = 5.3 \text{ mm}^2 \rightarrow 5.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Hasil dari nilai GMD dan GMR digunakan untuk menghitung nilai induktansi (L) dapat menggunakan persamaan (19) sebagai berikut.

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1.134}{5.3 \times 10^{-6}}$$

$$L = 2.45 \times 10^{-6} \text{ H / m} \rightarrow 2.45 \times 10^{-3} \text{ H / km}$$

Nilai Induktansi yang didapat akan digunakan untuk menghitung nilai reaktansi dengan menggunakan persamaan (20) sebagai berikut.

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 50 \times 2.45 \times 10^{-3}$$

$$X_L = 314 \times 2.45 \times 10^{-3}$$

$$X_L = 0.769 \Omega / km$$

Jadi besar nilai impedansi (Z) pada Segmen cab “Karbos – Samping Lap PLTD” – LBS motorize Swapodibo dapat dihitung dengan persamaan (21) sebagai berikut.

$$Z = R + jX_L$$

$$Z = 0.692 + j0.769 \Omega / km$$

Pada segmen yang lain dalam penyulang Karbos dan juga pada penyulang Karmar dilakukan perhitungan yang sama seperti pada perhitungan di atas untuk mendapatkan nilai dari resistansi, reaktansi dan impedansi di setiap segmen penyulang.

E. Perhitungan Jatuh Tegangan Pada Tahun 2023

Dalam mengetahui nilai jatuh tegangan pada penyulang sistem distribusi primer di ULP Biak Kota dapat menggunakan persamaan (24). Adapun data - data yang diperlukan yaitu sebagai berikut: panjang konduktor, arus beban, besaran saluran seperti tahanan dan reaktansi serta faktor daya. Nilai arus beban yang digunakan adalah nilai arus beban pada tahun 2023, Maka menghitung jatuh tegangan pada penyulang Karbos dapat diketahui dengan data sebagai berikut.

Diketahui:

$$I = 198.52$$

$$l = 3.105$$

$$R = 0.692$$

$$X = 0.769$$

$$\cos \theta = 0.8$$

$$\sin \theta = 0.6$$

Besar nilai jatuh tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan (24) seperti berikut.

$$\Delta V_{3\phi} = \sqrt{3} \times I \times l \times (R \cos \theta + X \sin \theta)$$

$$\Delta V_{3\phi} = \sqrt{3} \times 198.52 \times 3.105 \times (0.692 \times (0.8) + 0.769 \times (0.6))$$

$$\Delta V_{3\phi} = 1067.6 \times 1.01$$

$$\Delta V_{3\phi} = 1078.2 \text{ Volt} \rightarrow 1.07 \text{ kV}$$

Nilai persentase jatuh tegangan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (26) berikut.

$$\% \Delta V_{3\phi} = \frac{\Delta V_{3\phi}}{V} \times 100\%$$

$$\% \Delta V_{3\phi} = \frac{1.07}{20} \times 100\%$$

$$\% \Delta V_{3\phi} = 5.35\%$$

Dengan dilakukan perhitungan yang sama di setiap segmen penyulang Karbos dan Karmar, dari hasil perhitungan jatuh tegangan di atas, pada penyulang Karbos jatuh tegangan yang telah melebihi standar yang diizinkan yaitu pada Segmen LBS Taman Burung – LBS motorize APMS dengan persentase sebesar 11.15%, sehingga tegangan yang diterima pada ujung saluran sangat rendah yaitu sebesar 14.125 kV.

Untuk penyulang Karmar nilai jatuh tegangan yang didapatkan di setiap segmen masih sesuai dengan standar yang ada yaitu di bawah 10%, namun tegangan yang diterima pada ujung saluran telah kurang dari standar yang ada yaitu sebesar 17.712 kV.

III. HASIL DAN PERBAIKAN JATUH TEGANGAN

A. Besar Nilai Beban pada Tahun 2033

Nilai arus beban yang terjadi di tahun 2033 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan regresi linier pada persamaan (4). Maka perkiraan pemakaian total energi di ULP Biak Kota yang akan terjadi dalam sepuluh tahun ke depan yaitu dari tahun 2024 sampai pada tahun 2033 dapat dihitung sebagai berikut.

$$m = 9529589.525$$

$$n = 237430774.65$$

$$X = 8 \text{ (tahun 2024)}$$

Solusi:

$$Y = mX + n$$

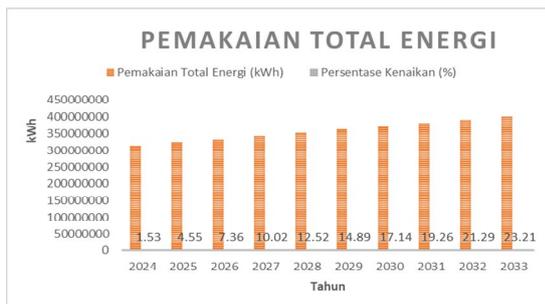
$$Y = 9529589.525(8) + 237430774.65$$

$$Y = 313667490.85 \text{ kWh}$$

Besar nilai pemakaian total energi yang terjadi di ULP Biak Kota sampai dengan tahun 2033 sesuai dengan hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel VII berikut.

TABEL VII
PERKIRAAN PEMAKAIAN TOTAL ENERGI 2024 SAMPAI 2033 ULP BIAK KOTA

Tahun	Pemakaian Total Energi (kWh)	Persentase Kenaikan (%)
2023	308912876	-
2024	313667490.85	1.53
2025	323197080.375	4.55
2026	332726669.9	7.36
2027	342256259.425	10.02
2028	351785848.95	12.52
2029	361315438.475	14.89
2030	370845028	17.14
2031	380374617.525	19.26
2032	389904207.05	21.29
2033	399433796.575	23.21
Total Persentase Kenaikan (%)		131.77



Gambar 3. Grafik Perkiraan Pemakaian Total Energi di ULP Biak Kota 2033

Nilai kenaikan pemakaian energi setiap tahun diperoleh dari hasil perhitungan kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 3 di atas. Pada tahun 2033, kenaikan pemakaian total energi naik sebesar 23.21% dari tahun 2023, sehingga total persentase kenaikan pemakaian total energi pada sepuluh tahun ke depan mencapai 131.77%.

Pada grafik diperlihatkan kenaikan yang linier dikarenakan berdasarkan hasil perhitungan perkiraan pemakaian total energi, kebutuhan akan daya listrik pada sistem kelistrikan ULP Biak Kota meningkat setiap tahunnya. Setelah mendapatkan persentase kenaikan dari pemakaian total energi di tahun 2033, dapat dihitung besarnya beban pada masing - masing titik seksi yang tersebar di setiap penyulang sampai pada tahun 2033.

Besarnya nilai beban yang terjadi pada masing - masing segmen yang tersebar di penyulang Karbos dan Karmar pada tahun 2033 dapat dihitung sebagai berikut.

Diketahui:

Pada Segmen cab “Karbos – Samping Lap PLTD” – LBS motorize Swapodibo.

$$I_1 = 198.52 \text{ A (pada tahun 2023)}$$

$$\text{Total kenaikan energi} = 131.77\%$$

Nilai beban pada tahun 2033 dapat dihitung sebagai berikut.

$$\frac{I_2 - 198.52}{198.52} \times 100\% = 131.77\%$$

$$I_2 = 460.1 \text{ A}$$

Dari hasil perhitungan, nilai arus beban pada tahun 2033 adalah sebesar 460.1 A. Perhitungan yang sama dilakukan di setiap segmen penyulang Karbos dan Karmar sehingga nilai arus beban yang didapat akan digunakan untuk menghitung nilai jatuh tegangan pada sistem distribusi primer di ULP Biak Kota pada tahun 2033.

B. Jatuh Tegangan Pada Tahun 2033

Dalam menghitung besarnya nilai jatuh tegangan pada tahun 2033, nilai arus beban yang akan digunakan yaitu nilai dari hasil perkiraan beban yang terjadi, yang di mana nilai arus beban pada tahun 2033 naik sebesar 23.21%. Sehingga dalam menghitung jatuh tegangan pada penyulang Karbos dan Karmar digunakan nilai arus beban pada tahun 2033. Hasil perhitungan jatuh tegangan pada penyulang Karbos di titik seksi Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo pada tahun 2033 dapat dihitung seperti berikut.

Diketahui:

$$I = 460.1 \text{ A (pada tahun 2033)}$$

Nilai jatuh tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan (24) seperti berikut.

$$\Delta V_{30} = \sqrt{3} \times I \times l \times (R \cos \theta + X \sin \theta)$$

$$\Delta V_{30} = \sqrt{3} \times 460.1 \times 3.105 \times (0.692 \times (0.8) + 0.769 \times (0.6))$$

$$\Delta V_{30} = 2474.4 \times 1.01$$

$$\Delta V_{30} = 2499 \text{ Volt} \rightarrow 2.5 \text{ kV}$$

Persentase jatuh tegangan dapat dihitung dengan persamaan (26) sebagai berikut.

$$\% \Delta V_{3\theta} = \frac{\Delta V_{3\theta}}{V} \times 100\%$$

$$\% \Delta V_{3\theta} = \frac{2.5}{20} \times 100\%$$

$$\% \Delta V_{3\theta} = 12.5\%$$

Perhitungan yang sama dilakukan pada setiap segmen dalam penyulang Karbos dan Karmar untuk mendapatkan nilai jatuh tegangan pada tahun 2033. Dari hasil perhitungan di atas, Jika besarnya nilai jatuh tegangan pada tahun 2033 dibandingkan dengan nilai jatuh tegangan di tahun 2023, kualitas tegangan yang terjadi pada penyulang Karbos dan karmar semakin buruk, hal ini dibuktikan bahwa semakin bertambah besar beban yang ada, semakin besar juga jatuh tegangan yang terjadi, sehingga perlu dilakukan perbaikan agar jatuh tegangan yang terjadi dapat sesuai dengan standar PLN yang ada.

Pada penyulang Karbos, nilai jatuh tegangan pada tahun 2033 sangatlah buruk. Hal ini dikarenakan di semua titik seksi penyulang Karbos untuk nilai tegangannya telah kurang dari standar yang diizinkan (<18 kV). Dari semua seksi penyulang Karbos, titik seksi yang mengalami jatuh tegangan terbesar yaitu Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo dan Segmen LBS Taman Burung - LBS motorize APMS dengan persentase jatuh tegangan mencapai 12.5% dan 25.85%. Nilai tegangan yang diterima di ujung saluran penyulang sangatlah rendah yaitu 6.299 kV. Nilai penurunan tegangan yang terjadi di setiap seksi jalur utama SUTM diperoleh dari hasil perhitungan kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4. Profil Nilai Tegangan pada Penyulang Karbos



Gambar 5. Profil Nilai Tegangan pada Penyulang Karmar

Untuk penyulang Karmar walaupun jatuh tegangannya tidak seburuk penyulang Karbos, namun jatuh tegangan yang ada juga harus diperhatikan dikarenakan dari setiap seksi yang ada pada penyulang ini, hanya terdapat empat seksi yang nilai tegangan terimanya sesuai standar PLN yang diizinkan, dikarenakan juga sangat dekat dengan sumber tegangan. Pada ujung saluran utama SUTM penyulang Karmar nilai tegangan yang diterima sebesar 14.087 kV. sehingga perlu juga dilakukan perbaikan jatuh tegangan agar profil tegangan di penyulang Karmar sangat baik dan dapat sesuai dengan standar yang diizinkan.

C. Perbaikan Jatuh Tegangan

Dalam mengatasi nilai jatuh tegangan yang sangat besar pada penyulang Karbos dan Karmar, perlu dilakukan perbaikan dengan cara menambahkan kapasitor daya pada jaringan SUTM penyulang Karbos dan Karmar. Untuk Penyulang Karbos dan Karmar titik penambahan kapasitor daya akan diutamakan pada titik seksi yang mengalami nilai jatuh tegangan kurang dari standar yang diizinkan. Ada beberapa titik yang akan ditambahkan kapasitor daya yaitu pada titik seksi Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo dan Segmen LBS Taman Burung - LBS motorize APMS. Namun, jika tegangan yang diterima masih kurang dari standar yang diizinkan maka kapasitor daya akan ditambahkan di setiap titik 1/3 dari total panjang saluran utama dan dibagi 1/3 dari total kebutuhan kVAR pada penyulang Karbos. Untuk hasil perhitungan untuk kapasitas kapasitor dan jumlah kapasitor yang akan ditambahkan di penyulang Karbos pada tahun 2033 yaitu sebagai berikut.

Diketahui:

Data trafo distribusi total pembebanan pada Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo yaitu sebesar 137.54 kVA pada tahun 2023. Untuk perkiraan beban yang terjadi pada sepuluh tahun ke depan yaitu sebesar 318.77 kVA.

$$S = 318.77 \text{ kVA.}$$

$$\cos \theta_1 = 0.80, \text{ artinya } \theta_1 = 38.86^\circ$$

$$\cos \theta_2 = 0.95 \text{ (Target } \cos \theta \text{ yang akan dicapai),}$$

$$\text{artinya } \theta_2 = 18.19^\circ$$

Untuk mendapatkan nilai daya aktif yang dipakai dapat dihitung menggunakan persamaan (11) seperti berikut.

$$\cos \theta_1 = \frac{P}{S}$$

$$0.80 = \frac{P}{318.77}$$

$$P = 0.80 \times 318.77 = 255.01 \text{ kW}$$

Nilai daya aktif yang dipakai digunakan untuk mendapatkan nilai kapasitas kapasitor daya menggunakan persamaan (28) sebagai berikut.

$$Q_1 = S \sin \theta_1$$

$$Q_1 = 318.77 \times 0.6 = 191.262 \text{ kVAR (Daya reaktif awal)}$$

$$Q_c = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$Q_c = 255.01 \times (\tan 36.86 - \tan 18.19)$$

$$Q_c = 107.39 \text{ kVAR}$$

Setelah mendapatkan besar kapasitas kapasitor daya yang digunakan, untuk mendapatkan nilai kapasitansi kapasitor dapat dihitung menggunakan persamaan (29) sebagai berikut.

$$C = \frac{Q_c}{2\pi fV^2}$$

$$C = \frac{107.39}{2 \times 3.14 \times 50 \times (20)^2}$$

$$C = \frac{107.39}{125600}$$

$$C = 0.00085501 \text{ F} \rightarrow 855.01 \mu\text{F}$$

Nilai daya reaktif baru setelah penambahan kapasitor daya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (27) sebagai berikut.

$$Q_2 = Q_1 - Q_C$$

$$Q_2 = 191.262 - 107.39$$

$$Q_2 = 83.872 \text{ kVAR}$$

Besar nilai daya semu yang baru setelah penambahan kapasitor daya yang dapat dihitung menggunakan persamaan (10) sebagai berikut.

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$= \sqrt{(255.01)^2 + (83.872)^2}$$

$$= 268.44 \text{ kVA}$$

Dengan demikian nilai faktor daya baru setelah penambahan kapasitor daya yaitu sebagai berikut.

$$\cos \theta_2 = \frac{255.01}{268.44} = 0.94$$

Nilai faktor daya yang baru setelah penambahan kapasitor daya adalah sebesar 0.94, dengan demikian untuk nilai arus setelah penambahan kapasitor daya dapat dihitung menggunakan persamaan (25) sebagai berikut.

$$I_{3\theta} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos \theta}$$

$$I_{3\theta} = \frac{255.01}{\sqrt{3} \times 20 \times 0.94}$$

$$I_{3\theta} = 7.83 \text{ A}$$

Dapat dilihat dari hasil perhitungan di atas, untuk kapasitas kapasitor yang perlu ditambahkan pada titik seksi Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo yaitu sebesar 107.39 kVAR dengan kapasitansi sebesar 855.01 μF . Dengan kompensasi dari kapasitor, pemakaian daya reaktif oleh sistem dapat berkurang menjadi 89.2556 kVAR. Dengan berkurangnya pemakaian daya reaktif, nilai faktor daya setelah penambahan kapasitor menjadi lebih tinggi nilainya yaitu sebesar 0.94 serta nilai arus setelah penambahan kapasitor akan semakin rendah yaitu sebesar 7.83 A.

Hasil perhitungan jatuh tegangan setelah pemasangan kapasitor daya pada penyulang Karbos di titik seksi Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo pada tahun 2033 yaitu sebagai berikut.

Diketahui:

$$Q_C = 107.039 \text{ kVAR}$$

$$V = 17.5 \text{ kV (Tegangan yang diterima sebelum perbaikan)}$$

Nilai komponen arus reaktif leading (I_C) dapat dihitung menggunakan persamaan (31) sebagai berikut.

$$I_C = \frac{Q_C}{V}$$

$$I_C = \frac{107.39}{17.5} = 6.13 \text{ A}$$

Nilai jatuh tegangan dengan penambahan kapasitor daya dapat dihitung menggunakan persamaan (33) sebagai berikut.

$$\Delta V_{3\theta} = I_R R + I_X X_L - I_C X_L$$

$$\Delta V_{3\theta} = I_R R + X_L (I_X - I_C)$$

$$\Delta V_{3\theta} = 406.1 \times (0.692) + 0.769(7.83 - 6.13)$$

$$\Delta V_{3\theta} = 319.93 \text{ Volt} \rightarrow 0.32 \text{ kV}$$

Dengan persentase jatuh tegangannya:

$$\% \Delta V_{3\theta} = \frac{0.32}{20} \times 100\%$$

$$\% \Delta V_{3\theta} = 1.6\%$$

Dari hasil perhitungan di atas, telah didapatkan nilai jatuh tegangan baru pada Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo setelah penambahan kapasitor daya yaitu sebesar 0.32 kV atau 1.6% dengan kapasitas kapasitor sebesar 107.039 kVAR.

Untuk mendapatkan nilai jatuh tegangan pada Segmen LBS Taman Burung - LBS motorize APMS setelah pemasangan kapasitor dilakukan perhitungan yang sama seperti pada Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo.

Nilai jatuh tegangan yang baru setelah pemasangan kapasitor daya pada Segmen LBS Taman Burung - LBS motorize APMS dan Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo dapat dilihat pada tabel VIII sebagai berikut.

TABEL VIII
HASIL PERBAIKAN JATUH TEGANGAN PADA PENYULANG KARBOS

Seksi	$\Delta V_{3\theta}$ (kV)	$\Delta V_{3\theta}$ (%)	Q_C (kVAR)	C (μf)
Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo	0.32	1.6	107.39	855.01
Segmen LBS Taman Burung - LBS motorize APMS	0.42	2.14	69.817	555.86

Dari tabel VIII, nilai jatuh tegangan pada Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo dan Segmen LBS Taman Burung - LBS motorize APMS telah sesuai standar PLN yang diizinkan yaitu dengan nilai jatuh tegangan 1.6% dan 2.14%. Namun tegangan yang diterima pada ujung saluran masih kurang dari standart toleransi yang ada yaitu < 18 kV. Oleh karena itu perlu ditambahkan kapasitor daya pada penyulang Karbos.

Sesuai dari hasil perhitungan di atas, untuk total kebutuhan kapasitor di setiap segmen penyulang Karbos, didapatkan kebutuhan sebesar 499.62 kVAR. Kapasitas kapasitor yang akan ditambahkan pada penyulang Karbos untuk menaikkan tegangan agar sesuai dengan standar yang diizinkan akan dibagi menjadi empat unit berdasarkan kapasitas yang disediakan pada pabrikan, kapasitor yang disediakan memiliki kapasitas yaitu sebesar 50 kVAR yang ditambahkan pada Segmen Cab "Pertigaan Trafo Sisipan - Ujung Gardu SAU 301" - Ujung Gardu MAK 302, untuk kapasitor 100 kVAR akan ditambahkan pada Segmen Gardu BAR 303- Gardu TJB

301, untuk kapasitor 150 kVAR akan ditambahkan Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo dan 200 kVAR yang ditambahkan pada Segmen LBS Taman Burung - LBS motorize APMS.

Pada Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo sampai diujung saluran penyulang yaitu Segmen Cab "Pertigaan Trafo Sisipan - Ujung Gardu SAU 301" - Ujung Gardu MAK 302, untuk persentase kenaikan tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan (34) sebagai berikut.

Diketahui:

Pada Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo, kapasitor daya akan diletakkan pada tiang SUTM dengan kode kontruksi yaitu M8 dengan jarak pada sumber tegangan sebesar 2.899 km.

$$Q_C = 150 \text{ kVAR}$$

$$l = 2.899 \text{ kms (dari sumber tegangan ke lokasi kapasitor)}$$

$$X_L = 0.769 \Omega/\text{km}$$

$$V_{L-L} = 20 \text{ kV}$$

$$V_R = 17.5 \text{ kV}$$

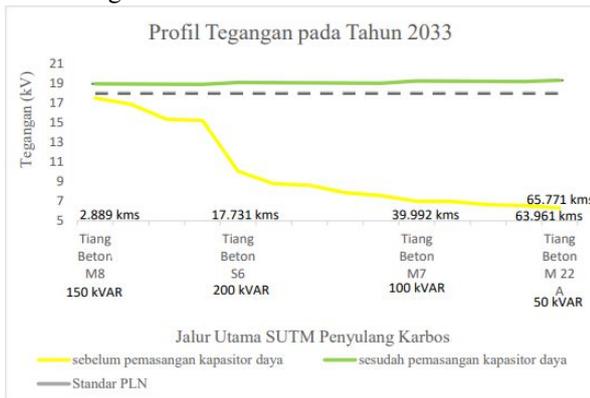
Kenaikan tegangan pada Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo dapat dihitung menggunakan persamaan (34) sebagai berikut.

$$\%VR = \frac{Q_C \times X_L \times l}{10 \times (V_{L-L})^2}$$

$$\%VR = \frac{150 \times 0.769 \times 2.899}{10 \times (20)^2}$$

$$\%VR = 8.35\%$$

Persentase kenaikan tegangan yang terjadi membuat nilai tegangan yang diterima pada Segmen cab "Karbos - Samping Lap PLTD" - LBS motorize Swapodibo naik sebesar 18.96 kV. Sesuai perhitungan di atas, didapatkan nilai tegangan yang diterima pada ujung saluran sebesar 19.31 kV. Untuk profil tegangan yang baru sesuai dengan perhitungan di atas pada tahun 2033 ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 6 sebagai berikut.



Gambar 6. Profil Tegangan Setelah Pemasangan Kapasitor pada Penyulang Karbos

Pada gambar 4.4, untuk memperbaiki kualitas atau profil tegangan yang semakin memburuk pada tahun 2033, dibutuhkan peran kapasitor daya untuk memperbaiki profil tegangan pada penyulang Karbos. Pada penyulang Karbos dibutuhkan penambahan empat unit kapasitor daya dengan kapasitas yang berbeda yang diletakkan pada empat titik yang berbeda sehingga total kapasitas kapasitor yang akan ditambahkan pada penyulang Karbos yaitu sebesar 500 kVAR.

Nilai tegangan yang diterima pada ujung saluran bisa dikatakan baik yaitu dengan nilai tegangan mencapai 19.31 kV. Tegangan yang diterima di setiap seksi penyulang Karbos pada tahun 2033 telah sesuai standar PLN yang diizinkan.

Untuk Penyulang Karmar dilakukan perhitungan yang sama seperti perhitungan pada penyulang Karbos. Untuk memperbaiki kualitas atau profil tegangan yang semakin memburuk pada tahun 2033 tepatnya pada penyulang Karmar dibutuhkan penambahan tiga unit kapasitor daya yang diletakkan pada tiga titik yang berbeda, yang di mana satu unit berkapasitas 50 kVAR diletakkan pada Segmen Cab."LBS ATBi-Gardu SOR502"-LBS Wapoga dan Segmen Recloser Yendidori-Fai Adoki. Untuk satu unit berkapasitas 45 kVAR diletakkan pada Segmen Gardu WRO501-Gardu WRO502. Total kapasitas kapasitor yang akan ditambahkan pada penyulang Karmar yaitu sebesar 145 kVAR, membuat nilai tegangan yang diterima pada ujung penyulang Karmar yaitu sebesar 19.25 kV. Sehingga nilai tegangan yang diterima di setiap seksi penyulang Karmar pada tahun 2033 telah sesuai standar PLN yang diizinkan.



Gambar 7. Profil Tegangan Setelah Pemasangan Kapasitor pada Penyulang Karmar

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Perkiraan besar beban pada penyulang distribusi di ULP Biak Kota dalam sepuluh tahun ke depan yaitu tepatnya pada tahun 2033, terjadi kenaikan beban sebesar 23.21%, sehingga mengakibatkan jatuh tegangan pada penyulang Karbos dan Karmar semakin besar. Jatuh tegangan terbesar pada penyulang Karbos dan Karmar mencapai 5.17 kV dan 2.38 kV. Maka diperlukan peran kapasitor daya untuk memperbaiki profil tegangan. Untuk penyulang Karbos, total kapasitas kapasitor yang akan ditambahkan adalah sebesar 500 KVAR yang akan dibagi menjadi empat unit kapasitor, yang di mana per unit kapasitor dapat berkapasitas 50 kVAR, 100 kVAR, 150 KVAR dan 200 kVAR, sehingga tegangan yang diterima pada ujung saluran Karbos dapat sesuai dengan standar yaitu 19.31 kV. Sedangkan pada penyulang Karmar, total kapasitor yang akan ditambahkan adalah sebesar 150 KVAR yang akan dibagi menjadi tiga unit dengan kapasitas per unit adalah 50 KVAR dan 45 kVAR, sehingga tegangan yang diterima pada ujung saluran adalah 19.25 kV. Maka dengan penambahan kapasitor daya pada penyulang Karbos dan Karmar, profil

tegangan pada tahun 2033 sesuai dengan standar yang diizinkan.

B. Saran

Dalam melakukan pemasangan kapasitor daya, perlu diperhatikan karakteristik persebaran beban jaringan distribusi untuk menentukan metode penempatan yang lebih optimal. Serta perlu juga dilakukan pergantian luas penampang penghantar menjadi yang lebih besar, dikarenakan panjang saluran SUTM yang sangat jauh agar dapat mengurangi jatuh tegangan yang berlebihan.

V. KUTIPAN

- [1] "SPLN 1 1995 Tegangan Standar," *dokumen.tips*, 1995. <https://dokumen.tips/documents/spln-1-1995-tegangan-standar-pln.html> (accessed Jun. 22, 2023).
- [2] S. Monantun, *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Paket Keahlian Teknik Ketenagalistrikan Semester 1 Sekolah Menengah Kejuruan*. Jakarta, 2014.
- [3] N. A. Basyarach, O. Penangsang, and A. Soeprijanto, "Optimal capacitor placement and sizing in radial distribution system using accelerated particle swarm optimization," *2017 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. ISITIA*, pp. 93–97, 2017.
- [4] D. Suswanto, *Buku Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, 1st ed. Padang, 2009. Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/379197385/Buku-Sistem-Distribusi-Tenaga-Listrik>
- [5] A. S. Pabla, *Electric power distribution*, 4th ed. New Delhi: McGraw Hill, 1997. Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: http://pustaka.elektro.ft.unand.ac.id/index.php?p=show_detail&id=731
- [6] N. Draper, *Analisis regresi terapan*, 2nd ed. Jakarta: Bambang Sumantri, 1992. Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: <https://opac.perpusnas.go.id/DetailOpac.aspx?id=452460>
- [7] W. N. Hardiranto, "Analisa Optimasi Perbaikan Faktor Daya dan Drop Voltage Dengan Menggunakan Kapasitor Bank Pada Line 5 PT Bukit Asam (Persero) TBK," Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2017.
- [8] A. Tanjung, "Rekonfigurasi Sistem Distribusi 20 kV Gardu Induk Teluk Lembu dan PLTMG Langgam Power Untuk Mengurangi Rugi Daya dan Drop Voltage," vol. 11, no. 2, 2014.
- [9] D. Tampubolon and M. Sjani, "Optimasi Penggunaan Kapasitor Bank Pada Jaringan 20 kV Dengan Simulasi Etap," vol. 9, no. 2, 2014.
- [10] M. N. Hidayatullah, "Analisa Rugi Daya dan Efisiensi Penyaluran Tenaga Listrik dari GI Seduduk Putih ke Jaringan Tegangan Menengah 20 kV UP3 Palembang UIW S2JB," other, Politeknik Negeri Sriwijaya, 2019. Accessed: Jun. 21, 2023. [Online]. Available: <http://eprints.polsri.ac.id/8176/>
- [11] N. J. Hontong and Maickel Tuegeh ST, MT, "Analisa Rugi – Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Di PT. PLN Palu," *ISSN .*, 2015.
- [12] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York: WCB/McGraw-Hill, 1999.
- [13] T. S. Hutaaruk, *Transmisi daya listrik*. Jakarta: Erlangga, 1985.
- [14] E.-E. E. David A. Snyder, *Voltage drop calculations (formulas, phasor diagram and real-world examples) | EEP*. Meadow Estate: EEP-Electrical Engineering, 2014. Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: <https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/electrical-engineering/voltage-drop>
- [15] M. F. Wahyudianto, S. Sarwito, and A. Kurniawan, "Analisa Tegangan Jatuh pada Sistem Distribusi Listrik di Kapal Penumpang dengan Menggunakan Metode Simulasi," *J. Tek. ITS SINTA 4 11815*, vol. 5, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2017, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.19716.
- [16] B. F. Risjayanto, "Optimal Capacitor Placement (OCP) Pada Sistem Jaringan Distribusi 20 kV Menggunakan ETAP," vol. 08, pp. 1–9, 2019.

- [17] J. Landang, S. Silimang, and M. Tuegeh, "Optimasi Penempatan Kapasitor Pada Jaringan Transmisi Teling-Tomohon Menggunakan Kecerdasan Buatan," 2015.

TENTANG PENULIS



Penulis bernama lengkap **Lewi Fernando Simarmata**, lahir di Biak, Papua pada 13 Maret 2001. Penulis memulai Pendidikan di SD Negeri Perumnas Sumberker Biak pada tahun 2007 – 2013, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Biak Kota pada tahun 2013 – 2016, lalu melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Biak Kota pada tahun 2016 – 2019. Tahun 2019, penulis melanjutkan pendidikan S1 di program studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi Manado dan mengambil konsentrasi minat Teknik Tenaga Listrik dan Tegangan Tinggi pada tahun 2021. Selama menjalani Pendidikan, penulis mengikuti Kerja Praktek di PT. Hendri Elyon Narwastu pada Juli-September 2022 dan tergabung dalam kepengurusan organisasi Himpunan Mahasiswa Elektro. Penulis pernah ikut terlibat dalam kegiatan Kuliah Kerja Terpadu (KKT) pada KKT 133 Posko Winangun Atas, Kecamatan Pineleng, Kabupaten Minahasa.