

STUDI SUSUT DAYA JARINGAN DISTRIBUSI PRIMER AREA LUWUK MELALUI SIMULASI ALIRAN DAYA MENGUNAKAN METODE NEWTON RAPHSON

I Kadek Winarta^{*)}, Ervan Hasan Harun dan Jamal Darusalam Giu

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Negeri Gorontalo
Jl. B.J. Habibie, Kab.Bone Bolango, Gorontalo, Indonesia

^{*)}E-mail: winartanadi@gmail.com

Abstrak

Jaringan distribusi primer area Luwuk adalah jaringan yang terisolasi dari sistem transmisi Sulutenggo. Tenaga listrik di wilayah Luwuk bersumber dari pembangkit listrik tenaga diesel dan mesin gas yang disalurkan pada 14 penyulang untuk melayani Kota Luwuk dan sekitarnya. Semakin panjang suatu penyulang, maka semakin besar nilai impedansinya, yang mengakibatkan susut daya pada jaringan distribusi. Studi aliran daya dengan metode Newton Raphson digunakan untuk mengetahui besar susut daya pada sistem tenaga listrik. Hasil studi aliran daya menunjukkan terjadi susut daya aktif pada jaringan distribusi primer area Luwuk sebesar 605 kW dengan persentase susut 3,4% dan susut daya reaktif sebesar 576 kVAR (8,41%) dan terjadi penurunan tegangan yang melampaui batas minimum tegangan pelayanan pada ujung penyulang Salodik yaitu -10,95%. Dengan penambahan kapasitor bank sebesar 100 kVAR pada ujung penyulang Salodik, nilai penurunan tegangan pada penyulang tersebut berkurang dari -10,95% menjadi -7,85% sehingga memenuhi batas minimum tegangan pelayanan, dan terjadi penurunan susut daya aktif menjadi 591 kW (3,32%) dan susut daya reaktif menjadi 555 kVAR (8,19%). Kerugian energi listrik yang dialami PLN perbulan pada distribusi primer area Luwuk adalah 435.600 kWh, dengan estimasi kerugian Rp.629.311.320. Setelah perbaikan, kerugian energi menjadi 425.520 kWh atau Rp.614.748.744 sehingga terjadi penurunan kerugian PLN sebesar Rp. 14.562.576 perbulan.

Kata kunci: Aliran daya, Susut Daya, Newton Raphson, ETAP 16.0, Jatuh Tegangan, Kapasitor bank

Abstract

The Luwuk primary distribution network is isolated from Sulutenggo transmission network. Electricity in Luwuk area comes from diesel and gas engine power plant distributed to fourteen feeders to serve greater Luwuk area. The longer the feeder, the greater the impedance value resulting in power losses in the network. Power flow study using Newton Raphson method is used to determine the power loss in electric power system. The study found active power loss in Luwuk area distribution network of 605 kW (3.4%), reactive power loss of 576 kVAR (8.41%) and voltage drop of -10.95% that exceeds the minimum service voltage limit at Salodic feeder tip. With the addition of a 100 kVAR capacitor bank at the tip of the Salodic feeder, the value of the voltage drop at the feeder is reduced from -10.95% to -7.85% which meets the minimum service voltage limit, while active power loss decrease to 591 kW (3.32%) and reactive power reduced to 555 kVAR (8.19%). The electrical energy losses experienced by PLN during one month in Luwuk area were 435,600 kWh or estimated loss of Rp. 629,311,320. After improvement, the losses become 425,520 kWh or Rp. 614,748,744 that PLN losses were reduced by Rp. 14,562,576 monthly.

Keywords: Power flow, Power Losses, Newton Raphson, ETAP 16.0, Voltage Drop, Capacitor bank

1. Pendahuluan

Jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya yang besar agar sampai ke konsumen [1] [2]. Secara umum jaringan distribusi dibedakan menjadi dua berdasarkan tegangan kerjanya yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Jaringan distribusi primer merupakan jaringan tenaga listrik yang digunakan

untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk (GI) ke gardu distribusi [3]. Jaringan ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Ketika di lapangan, operator menentukan sendiri konfigurasi penyulang berdasarkan pengalaman dan pengetahuan teknis yang mereka miliki [4]. Konfigurasi penyulang yang biasa digunakan yaitu konfigurasi radial, loop dan spindel.

Penyaluran daya listrik dari pembangkit sampai ke konsumen melalui suatu sistem penyaluran yang panjang, terdapat parameter-parameter yang mempengaruhi besaran tenaga listrik yang diterima. Adapun yang mempengaruhi sistem penyaluran daya listrik pada saluran udara tegangan menengah adalah pengaruh eksternal yaitu kondisi lingkungan dan pengaruh internal yaitu pengaruh yang dialami oleh saluran listrik tegangan menengah akibat dari kondisi penyaluran tenaga listrik yang berupa resistansi, induktansi dan kapasitansi [5].

Terdapat berbagai kendala yang menyebabkan mutu dan kehandalan penyaluran tenaga listrik menjadi tidak baik. Jatuh tegangan atau *drop voltage* adalah besar penurunan atau kehilangan nilai tegangan listrik pada suatu penghantar dari nilai tegangan normalnya atau bisa juga disebut bahwa tegangan jatuh adalah selisih antara besar tegangan pangkal (sumber) dengan besar tegangan ujung (beban) dari suatu instalasi tenaga listrik [6]. Pada sistem tenaga listrik bolak-balik besar jatuh tegangan tergantung dari Z (impedansi) dan Y (admitansi) jaringan, serta pada beban dan faktor daya ($\cos \varphi$). Jatuh tegangan relatif dinamakan regulasi tegangan (*voltage regulation*) [7]. Selain jatuh tegangan, impedansi jaringan yang besar juga mengakibatkan terjadinya susut daya pada suatu jaringan distribusi. Apabila jaringan distribusi dengan impedansi yang besar dialiri arus yang besar, maka akan menyebabkan naiknya susut daya listrik pada jaringan tersebut.

Studi aliran daya digunakan untuk mengungkapkan kinerja dan aliran daya (P dan Q) pada keadaan tertentu yaitu ketika sistem bekerja saat tunak (*steady state*) [8]. Studi aliran daya merupakan hal yang sangat penting dalam perencanaan dan pengembangan suatu sistem tenaga listrik sebelum dipasang [9]. Karena ketidak-linearitas persamaan aliran daya maka penyelesaiannya dilakukan dengan metode iterasi. Studi aliran daya digunakan untuk mengetahui aliran daya aktif dan reaktif pada cabang-cabang rangkaian, mengetahui kondisi tegangan busbar agar dalam batas-batas yang dapat diterima, mengetahui pengaruh perubahan pada suatu sistem, mengetahui pengaruh putusnya rangkaian dalam keadaan darurat, mengetahui kondisi optimum pembebanan sistem dan mengetahui susut daya optimum sistem [10] [11].

Analisis aliran daya dibutuhkan untuk menentukan kondisi operasi sistem tenaga dalam kondisi optimal melalui pemecahan persamaan aliran daya pada jaringan [12] [10]. Metode Newton Raphson adalah salah satu metode yang dapat digunakan dalam studi aliran daya yang secara luas digunakan untuk permasalahan persamaan non-linear [12]. Penyelesaian persamaan ini menggunakan permasalahan yang linear dengan solusi pendekatan. Metode ini dapat diaplikasikan untuk satu persamaan atau beberapa persamaan dengan beberapa variabel yang tidak diketahui [13]. Untuk sistem tenaga listrik yang besar, metode Newton Raphson sangat efisien dan praktis dalam

menyelesaikan analisis aliran daya [14]. Penyelesaian perhitungan aliran daya pada sistem dengan banyak busbar memerlukan bantuan komputer agar perhitungan dapat dilakukan lebih cepat dan meminimalkan kesalahan dalam perhitungan.

ETAP adalah *software* untuk power sistem yang bekerja berdasarkan perencanaan (*plant/project*) [15]. ETAP dapat digunakan untuk melakukan pemodelan sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*one line diagram*) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai analisis, antara lain; aliran daya, hubung singkat, *starting motor*, *transient stability*, koordinasi *relay proteksi* dan sistem harmonisasi [16].

Studi susut daya pada jaringan distribusi area Palu dengan perhitungan manual pernah dilakukan [5], penelitian yang sama pada lokasi berbeda juga dilakukan pada jaringan distribusi area Manado [17]. Pada penelitian tersebut didapatkan besaran dan persentase rugi daya pada masing-masing jaringan yang dibahas. Penelitian tersebut tidak membahas solusi yang dapat dilakukan untuk mengatasi kerugian daya. Penelitian menggunakan *software* ETAP pernah dilakukan pada penyulang Arwana [18], dengan kesimpulan bahwa dengan melakukan pelimpahan beban dapat mengurangi kerugian daya. Penelitian tersebut hanya dilakukan pada satu penyulang sehingga kerugian daya pada keseluruhan jaringan pada suatu sistem distribusi tidak dijelaskan pada penelitian tersebut.

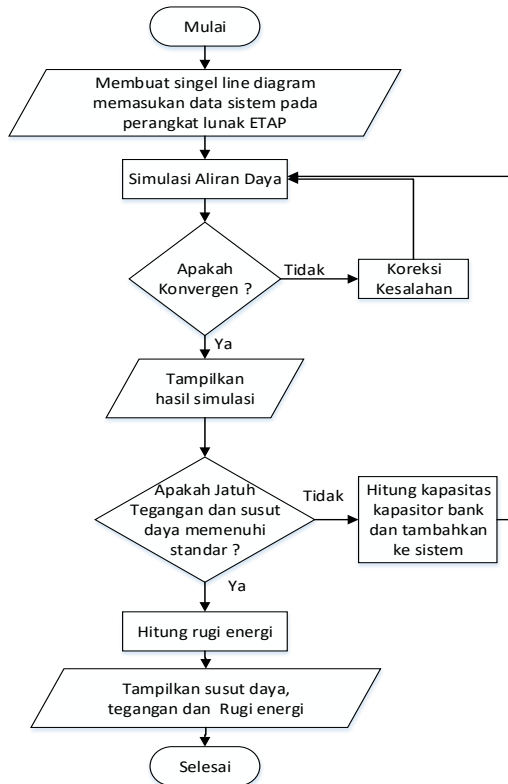
Penulisan artikel ini bertujuan untuk mengetahui kondisi susut daya yang terjadi pada jaringan distribusi primer area Luwuk, mengetahui kondisi setelah dilakukan upaya perbaikan dengan melakukan penambahan kapasitor bank dan untuk mengetahui pengaruh susut daya jaringan distribusi primer area Luwuk terhadap kerugian energi listrik pada PT. PLN (Persero) UP3 Luwuk. Studi susut daya dilakukan dengan simulasi aliran daya menggunakan *software* ETAP 16.0 dengan metode perhitungan yang digunakan adalah metode Newton Raphson. Metode ini dipilih karena jaringan distribusi area Luwuk merupakan jaringan yang terdapat banyak busbar, sehingga penggunaan metode Newton Raphson sangat cocok digunakan karena lebih efisien dan praktis dalam menyelesaikan analisis aliran daya [14].

2. Metode

2.1. Diagram Alir Penelitian

Gambar 1 memperlihatkan seluruh tahapan penelitian dari awal hingga akhir. Tahap awal berupa kegiatan pembuatan diagram satu garis sistem distribusi listrik primer area Luwuk di lembar kerja aplikasi ETAP. Tahapan iteratif dilakukan sebagai inti dari simulasi. Tahapan ini menggunakan nilai jatuh tegangan di setiap bus sebagai fungsi tujuan. Variabel peubah pada simulasi adalah nilai kapasitor yang ditambahkan ke sistem distribusi untuk menginjeksi daya reaktif sebagai kompensator. Konstrain

jatuh tegangan dan susut daya yang telah memenuhi standar akan menghentikan iterasi dan dilanjutkan dengan tahapan akhir yakni perhitungan rugi energi.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2. Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan dengan menggunakan metode Newton Raphson yang terintegrasi pada perangkat lunak ETAP 16.0. Ada beberapa tahapan yang dilakukan untuk melakukan simulasi aliran daya yaitu:

- Membuat *single line diagram* dan memasukkan data-data jaringan yang telah diperoleh ke perangkat lunak ETAP 16.0.
- Menjalankan simulasi Aliran daya dengan metode Newton Raphson pada program ETAP 16.0, sehingga akan ditampilkan daya dan tegangan pada tiap bus.
- Selanjutnya adalah menampilkan hasil simulasi.
- Melakukan simulasi perbaikan pada jaringan distribusi primer area Luwuk, yang dilakukan dengan cara melakukan penambahan kapasitor bank pada *feeder* dengan jatuh tegangan melampaui SPLN.
- Tampilkan hasil simulasi setelah perbaikan
- Menghitung rugi energi listrik.

2.3. Metode Newton Raphson

Perhitungan dengan metode ini dimulai dengan membentuk impedansi jaringan (Z_{ij}) dengan rumus:

$$Z_{ij} = R_{ij} + X_{ij} \quad (1)$$

dimana:

Z_{ij} = impedansi jaringan antara bus i dan j
 R_{ij} = resistansi jaringan antara bus i dan j
 X_{ij} = reaktansi jaringan antara bus i dan j .

Kemudian impedansi jaringan dikonversi menjadi admitansi jaringan (Y_{ij}) dengan rumus:

$$Y_{ij} = Yr_{ij} + jYx_{ij} \quad (2)$$

dimana:

$$Yr_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \text{ dan } Yx_{ij} = \frac{X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$$

Selanjutnya matriks admitansi bus Y dibentuk dengan komponen-komponen yang terdiri dari admitansi jaringan, kapasitansi saluran, dan perubahan *tapping* transformator. Kemudian matriks admitansi bus Y yang berbentuk rectangular dirubah dalam bentuk polar. Dimana sebelumnya matriks admitansi bus Y tersebut dipisahkan menjadi komponen matriks G dan matriks B . Daya terjadwal yang ada pada setiap bus dihitung dengan rumus:

$$P_i^{jd} = P_{Gi} - P_{Li} \quad (3)$$

$$Q_i^{jd} = Q_{Gi} - Q_{Li} \quad (4)$$

dimana:

P_i^{jd} = daya aktif terjadwal

Q_i^{jd} = daya reaktif terjadwal

P_{Gi} = daya aktif pembangkitan

Q_{Gi} = daya reaktif pembangkitan

P_{Li} = daya aktif beban

Q_{Li} = daya reaktif beban.

Dalam proses iterasi dicari daya terhitung dengan rumus:

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_n V_i| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (5)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_n V_i| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (6)$$

dimana:

P_i = daya aktif terhitung pada bus i

Q_i = daya reaktif terhitung pada bus i .

Mismatch daya dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$\Delta P_i = P_i^{jd} - P_i^{hit} \quad (7)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{jd} - Q_i^{hit} \quad (8)$$

Setelah *mismatch* daya dihitung maka selanjutnya dihitung matriks Jacobian yang terdiri dari submatriks H , N , M dan L .

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & H & \vdots & \vdots & N & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & M & \vdots & \vdots & L & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & |V_2| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Setelah diperoleh harga dari masing-masing elemen pada sub matriks Jacobian maka dapat dihitung aliran daya dengan metode Newton Raphson dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} \text{ atau } \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

dan aliran daya setiap bus dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut ini.

$$P_{ij} - jQ_{ij} = |V_i|(V_i - V_j)(-Y_{ij}) + |V_i|V_i Y_{c ij} \quad (11)$$

2.4. Susut Daya

Susut daya (*losses*) adalah sejumlah daya yang hilang dalam proses pengaliran energi listrik mulai dari Gardu Induk sampai dengan konsumen. Besarnya nilai susut daya aktif (ΔP) dan daya reaktif (ΔQ) pada saluran tiga fasa (3 ϕ) adalah sebesar [7]:

$$\Delta P = 3I^2 R.l \quad (12)$$

$$\Delta P (\%) = \frac{\left(\frac{S}{V}\right)^2 R.l}{S \cos \varphi} \cdot 100\% \quad (13)$$

$$\Delta Q = 3I^2 X.l \quad (14)$$

$$\Delta Q (\%) = \frac{\left(\frac{S}{V}\right)^2 X.l}{S \cos \varphi} \cdot 100\% \quad (15)$$

2.5. Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan relatif dinamakan regulasi tegangan (*voltage regulation*), dan dinyatakan oleh rumus [7]:

$$VR = \frac{E-V}{V} \times 100\% \quad (16)$$

Dimana:

E : tegangan pada pangkal pengiriman

V : tegangan pada ujung penerimaan.

2.6. Kapasitor Bank

Dalam menentukan kapasitansi kapasitor bank dilakukan terlebih dahulu perhitungan daya reaktif kompensator (Q_c). Pada prinsipnya, dalam perbaikan *PF* agar nilai *PF* ≈ 1 , sebuah kapasitor daya AC (kapasitor bank) harus mempunyai nilai daya reaktif kompensator Q_c yang sama

dengan nilai daya reaktif Q dari sistem yang akan diperbaiki faktor dayanya, atau dapat ditulis dengan [19]:

$$Q_c = \frac{V^2}{x_c} \quad (17)$$

Untuk menghitung daya reaktif yang dibutuhkan terhadap perubahan daya reaktif yang diinginkan dihitung dengan:

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (18)$$

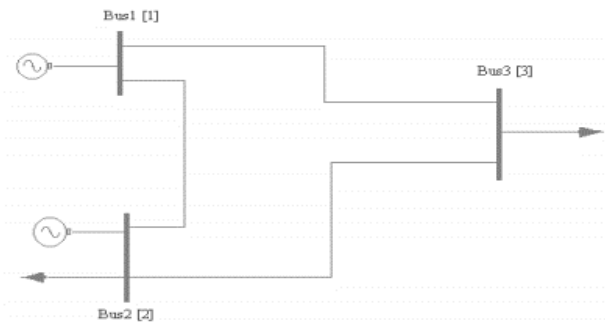
$$Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} \quad (19)$$

Atau untuk mengubah faktor daya dari $\cos \varphi_1$ menjadi $\cos \varphi_2$ dapat ditentukan dengan [20]:

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2). \quad (20)$$

2.7. Validasi

Pada penelitian ini validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan aliran daya pada perangkat lunak MATLAB dan ETAP 16.0. menggunakan metode Newton Raphson. Data sistem yang digunakan adalah data sistem IEEE 3 bus. Sistem IEEE 3 Bus merupakan sistem tenaga listrik sederhana yang digunakan untuk melakukan analisa sistem tenaga listrik. Sistem ini terdiri dari 3 bus dengan 2 unit pembangkit dan 3 saluran. Impedansi seri saluran dan suseptansi shunt per unit diberikan pada basis 100 MVA [21].



Gambar 2. Diagram Segaris IEEE 3 Bus System [21]

Untuk data admitansi dan *line charging* pada sistem ini ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Admitansi Dan *Line Charging* [21]

| Bus | Admitansi (Y_{pq}) | Line charging ($Y'_{pq}/2$) |
|-----|------------------------|-------------------------------|
| 1-2 | 1,47 - j5,88 | j0,015 |
| 1-3 | 2,94 - j11,77 | j0,07 |
| 2-3 | 2,75 - j9,17 | j0,04 |

Data pembangkit, beban dan tegangan pada masing-masing bus ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Pembangkit, Beban Dan Tegangan Bus[21]

| Bus No. | Tegangan Bus (p.u) | Pembangkit | | Beban | |
|---------|--------------------|------------|----------|--------|----------|
| | | P (MW) | Q (MVAR) | P (MW) | Q (MVAR) |
| 1 | 1,04 + j0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1,02 + j0,0 | 100 | - | 50 | 20 |
| 3 | 1,00 + j0,0 | 0 | 0 | 250 | 150 |

2.3.1. Perbandingan hasil perhitungan Tegangan perangkat lunak MATLAB dengan ETAP 16.0

Tabel 3 menunjukan selisih tegangan dari hasil perhitungan menggunakan perangkat lunak MATLAB dan ETAP.

Tabel 3. Selisih Tegangan Dari Hasil Perhitungan MATLAB Dan ETAP

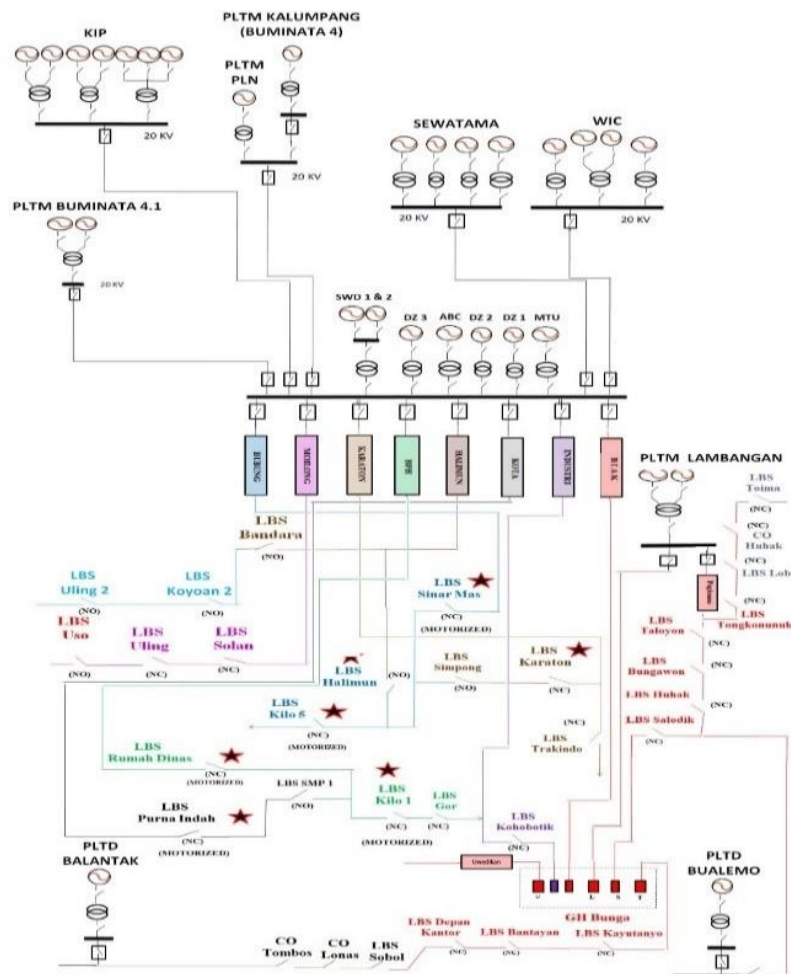
| Bus | Tegangan (kV) | | Selisih |
|-----|---------------|--------------|-------------|
| | ETAP | MATLAB | |
| 1 | 10,4∠0° | 10,4∠0° | 0∠0° |
| 2 | 10,2∠-3,1° | 10,2∠-3,082° | 0∠0,018° |
| 3 | 9,24∠-7° | 9,26∠-7,017° | 0,02∠0,017° |

Berdasarkan Tabel 3 terlihat bahwa tidak terdapat selisih tegangan pada bus 1. Pada bus 2 dan bus 3 terdapat selisih yang sangat kecil antara hasil dari perangkat lunak MATLAB dan ETAP dengan persen kesalahan tidak sampai 1%.

2.3.2. Perbandingan hasil perhitungan Aliran daya perangkat lunak MATLAB dengan ETAP 16.0

Tabel 4 menunjukkan aliran daya dari hasil perhitungan menggunakan perangkat lunak MATLAB dan ETAP.

Berdasarkan Tabel 4 terlihat bahwa tidak terdapat selisih aliran daya yang besar antara perhitungan menggunakan perangkat lunak MATLAB dan ETAP 16.0. Selisih aliran daya aktif terbesar terjadi pada bus 1 ke bus 2 yaitu sebesar 0,154 MW dan selisih daya reaktif terbesar terjadi pada bus 1 ke bus 3 yaitu sebesar 6,981 MVAR.



Gambar 3. Single Line Diagram Jaringan Distribusi Primer Area Luwuk

Tabel 4. Selisih Aliran Daya Dari Hasil Perhitungan Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB Dan ETAP

| Bus | | Daya | | | | Selisih | |
|------|----|----------|---------|----------|--------|---------|-------|
| dari | ke | P (MW) | | Q (MVAR) | | P | Q |
| | | ETAP | MATLAB | ETAP | MATLAB | | |
| 1 | 2 | 36,964 | 36,81 | 3,908 | 3,13 | 0,154 | 0,778 |
| 1 | 3 | 175,482 | 175,36 | 112,441 | 105,46 | 0,122 | 6,981 |
| 2 | 1 | -36,451 | -36,30 | -3,445 | -4,27 | 0,151 | 0,825 |
| 2 | 3 | 86,451 | 86,31 | 72,256 | 67,71 | 0,141 | 4,546 |
| 3 | 1 | -167,298 | -167,32 | -86,458 | -86,84 | 0,022 | 0,382 |
| 3 | 2 | -82,7002 | -82,68 | -63,542 | -63,16 | 0,020 | 0,382 |

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Jaringan Distribusi Area Luwuk

Jaringan distribusi primer area Luwuk adalah jaringan yang terisolasi dari sistem transmisi Sulutenggo. Daya listrik pada jaringan distribusi ini dipasok dari PLTD dan PLTM. Jaringan distribusi primer area Luwuk merupakan jaringan tiga fasa dengan tegangan kerja 20 kV. Konstruksi saluran yang digunakan adalah saluran udara tegangan menengah atau SUTM. Terdapat 14 penyulang berbeban dan total gardu distribusi sebanyak 454 buah dengan total beban 20.007,36 KVA.

3.2. Susut Daya Jaringan Distribusi Area Luwuk

Berdasarkan data-data jaringan distribusi primer area Luwuk dilakukan simulasi aliran daya dengan metode Newton Raphson menggunakan perangkat lunak ETAP 16.0. dan didapatkan hasil simulasi aliran daya sebagai berikut.

a. Tegangan

Tabel 5. Tegangan Masing-Masing Penyulang Jaringan Distribusi Primer Area Luwuk

| No | Penyulang | Pangkal penyulang | | Ujung penyulang | |
|----|------------------|-------------------|---------|-----------------|---------|
| | | Tegangan (KV) | %V Drop | Tegangan (KV) | %V Drop |
| 1 | Moilong | 19,68 | -1,6 | 18,74 | -6,3 |
| 2 | Halimun | 19,68 | -1,6 | 19,61 | -1,95 |
| 3 | Bubung | 19,68 | -1,6 | 19,50 | -2,5 |
| 4 | Keraton | 19,68 | -1,6 | 19,64 | -1,8 |
| 5 | Biak | 19,68 | -1,6 | 19,06 | -4,7 |
| 6 | Industri | 19,68 | -1,6 | 19,04 | -4,8 |
| 7 | BPH | 19,68 | -1,6 | 19,44 | -2,8 |
| 8 | Kota | 19,68 | -1,6 | 19,58 | -2,1 |
| 9 | Tangeban-Sobol | 19,06 | -4,7 | 18,37 | -8,15 |
| 10 | Uwedikan | 19,06 | -4,7 | 18,45 | -7,75 |
| 11 | Salodik | 19,06 | -4,7 | 17,81 | -10,95 |
| 12 | Pagimana | 19,76 | -1,2 | 19,52 | -2,4 |
| 13 | Bualemo | 19,83 | -0,8 | 19,55 | -2,25 |
| 14 | Balantak selatan | 20,34 | 1,7 | 20,31 | 1,55 |
| 15 | Balantak utara | 20,34 | 1,7 | 20,31 | 1,55 |

Tegangan masing-masing penyulang setelah dilakukan simulasi aliran daya didapatkan hasil seperti pada Tabel 5.

Tabel 5 menunjukkan kondisi tegangan pada jaringan distribusi primer area Luwuk. Dari tabel diatas terlihat bahwa nilai tegangan terendah ada pada ujung penyulang Salodik yaitu sebesar 17,81 KV atau -10,95 % dari tegangan nominal sistem yaitu 20 KV. Berdasarkan SPLN 1 tahun 1995 pasal 4 poin 9 disebutkan bahwa "Variasi tegangan pelayanan ditetapkan maksimum +5% minimum -10% terhadap tegangan nominal" [22], yang berarti tegangan pada ujung penyulang Salodik telah melampaui batas minimum tegangan pelayanan.

b. Susut daya

Tabel 6 menunjukkan susut daya pada jaringan distribusi primer area Luwuk sebelum dilakukan perbaikan. Susut daya aktif sebesar 0,605 MW dengan persentase terhadap total pembangkitan sebesar 3,4% dan susut daya reaktif sebesar 0,576 MVAR dengan presentase terhadap total pembangkitan daya reaktif sebesar 8,41%.

Tabel 6. Susut Daya Aktif Dan Reaktif Jaringan Distribusi Primer Area Luwuk

| Total daya dibangkitkan | | Total beban | | Susut daya | |
|-------------------------|-------|-------------|-------|------------|-------|
| MW | MVAR | MW | MVAR | MW | MVAR |
| 17,774 | 6,842 | 17,169 | 6,266 | 0,605 | 0,576 |

Standar yang dipublikasikan oleh *International Electrotechnical Commission (IEC)* yang berjudul *Efficient Electrical Energy Transmission and Distribution* menyatakan bahwa perusahaan penyedia listrik umumnya mencoba membatasi kerugian energi di saluran udara menjadi sekitar 2,5%. Total kerugian antara pembangkit listrik dan gardu induk step-down berkisar 3% sampai 5%. Antara step-down gardu induk dan pengguna kerugiannya bisa hampir sama atau bahkan lebih besar. Oleh karena itu, kerugian keseluruhan antara pembangkit listrik dan pengguna dapat dengan mudah dinyatakan berada di antara 8% dan 15% [23]. Jadi berdasarkan standar tersebut susut daya pada jaringan distribusi berkisar antara 3% sampai 5% sehingga susut daya pada jaringan distribusi primer area Luwuk masih dalam batas wajar yaitu 3,4%.

3.3. Susut Daya Jaringan Distribusi Area Luwuk Setelah Penambahan Kapasitor Bank

Pemasangan kapasitor bank ke sistem bertujuan untuk mengkompensasi aliran daya reaktif ke beban. Penambahan kapasitor bank dilakukan pada ujung penyulang Salodik yang merupakan penyulang dengan jatuh tegangan yang melampaui batas sesuai SPLN. Total daya reaktif yang masuk dari GH Bunga ke penyulang Salodik adalah 98,7 kVAR. Besar $\cos \varphi$ yang diharapkan setelah perbaikan adalah 1, maka kapasitas kapasitor dapat dihitung sebagai berikut.

Karena $\cos \varphi = 1$, berdasarkan persamaan (19) maka $S_2 = P_2$, sehingga $Q_2 = 0$.

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = 98,7 - 0 = 98,7 \text{ kVAR}$$

Jadi, kapasitas kapasitor bank yang akan ditambahkan adalah 98,7 kVAR dibulatkan menjadi 100 kVAR. Setelah dilakukan penambahan kapasitor bank pada ujung penyulang Salodik, didapatkan hasil simulasi aliran daya setelah perbaikan sebagai berikut.

a. Tegangan

Tegangan masing-masing penyulang setelah dilakukan perbaikan didapatkan hasil terlihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Tegangan Penyulang Setelah Penambahan Kapasitor Bank

| No | Penyulang | Pangkal Penyulang | | Ujung Penyulang | |
|----|------------------|-------------------|---------|-----------------|---------|
| | | Tegangan (KV) | %V Drop | Tegangan (KV) | %V Drop |
| 1 | Moilong | 19,68 | -1,6 | 18,75 | -6,25 |
| 2 | Halimun | 19,68 | -1,6 | 19,61 | -1,95 |
| 3 | Bubung | 19,68 | -1,6 | 19,50 | -2,5 |
| 4 | Keraton | 19,68 | -1,6 | 19,64 | -1,8 |
| 5 | Biak | 19,68 | -1,6 | 19,08 | -4,6 |
| 6 | Industri | 19,68 | -1,6 | 19,04 | -4,8 |
| 7 | BPH | 19,68 | -1,6 | 19,45 | -2,75 |
| 8 | Kota | 19,68 | -1,6 | 19,58 | -2,1 |
| 9 | Tangeban-Sobol | 19,08 | -4,6 | 18,39 | -8,05 |
| 10 | Uwedikan | 19,08 | -4,6 | 18,47 | -7,65 |
| 11 | Salodik | 19,08 | -4,6 | 18,43 | -7,85 |
| 12 | Pagimana | 19,77 | -1,15 | 19,53 | -2,35 |
| 13 | Bualemo | 19,83 | -0,8 | 19,55 | -2,25 |
| 14 | Balantak selatan | 20,34 | 1,7 | 20,31 | 1,55 |
| 15 | Balantak utara | 20,34 | 1,7 | 20,31 | 1,55 |

Tabel 7 menunjukkan kondisi tegangan pada jaringan distribusi primer area Luwuk setelah penambahan kapasitor bank. Dari tabel tersebut terlihat bahwa nilai tegangan terendah ada pada ujung penyulang Tangeban-Sobol yaitu sebesar 18,39 KV atau -8,65 % dari tegangan nominal sistem yaitu 20 KV.

Berdasarkan SPLN 1 tahun 1995 pasal 4 poin 9 disebutkan, “Variasi tegangan pelayanan ditetapkan maksimum +5% minimum -10% terhadap tegangan nominal” [22], maka tegangan pada seluruh penyulang jaringan distribusi primer area Luwuk telah memenuhi standar PLN.

b. Susut daya

Susut daya aktif dan daya reaktif setelah dilakukan penambahan kapasitor bank ditunjukkan pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Susut Daya Aktif Dan Reaktif Setelah Penambahan Kapasitor Bank

| Total daya dibangkitkan | | Total beban | | Susut daya | |
|-------------------------|-------|-------------|-------|------------|-------|
| MW | MVAR | MW | MVAR | MW | MVAR |
| 17,764 | 6,772 | 17,172 | 6,216 | 0,591 | 0,555 |

Tabel 8 menunjukkan susut daya pada jaringan distribusi primer area Luwuk setelah dilakukan penambahan kapasitor bank. Susut daya aktif sebesar 0,591 MW dengan persentase terhadap total pembangkitan sebesar 3,32% dan susut daya reaktif sebesar 0,576 MVAR dengan presentase terhadap total pembangkitan daya reaktif sebesar 8,19%.

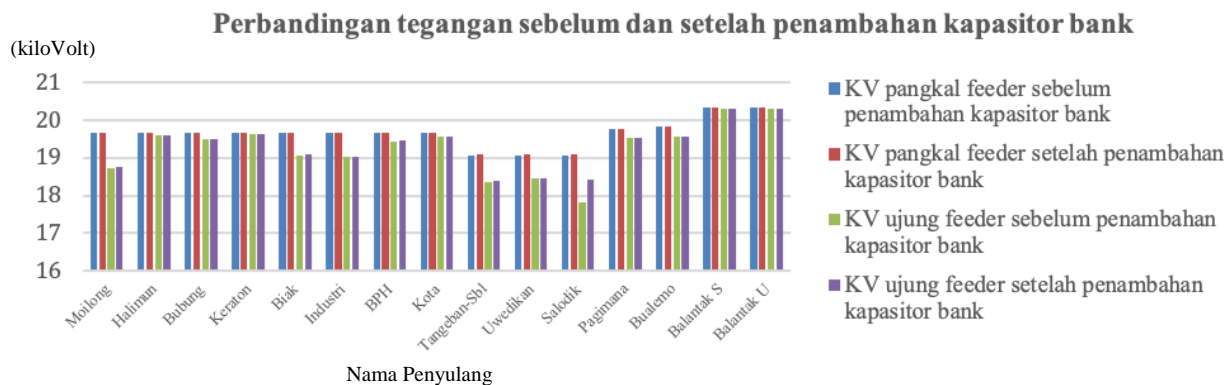
3.4. Perbandingan Susut Daya Jaringan Distribusi Area Luwuk Sebelum dan Setelah Penambahan Kapasitor Bank

a. Tegangan

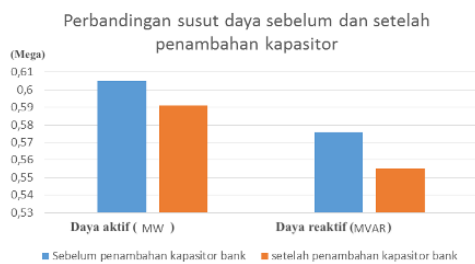
Perbandingan tegangan sebelum dan setelah penambahan kapasitor bank ditunjukkan pada Gambar 4. Dari grafik perbandingan tegangan terlihat kenaikan tegangan yang cukup signifikan pada penyulang Salodik. Hal ini terjadi karena ditambahkannya kapasitor bank pada ujung penyulang Salodik yang menyebabkan suplai daya reaktif dekat dengan beban. Dari tabel tersebut juga terlihat terjadi sedikit kenaikan tegangan pada GH Bunga (pangkal penyulang Salodik) karena penambahan kapasitor bank mengurangi beban GH Bunga dalam mensuplai daya reaktif ke penyulang Salodik.

b. Susut daya

Gambar 5 menunjukkan perbandingan susut daya sebelum dan setelah penambahan kapasitor bank. Dari grafik perbandingan susut daya terlihat penurunan susut daya aktif setelah dilakukan perbaikan. Hal ini membuktikan bahwa penambahan kapasitor bank dapat mengurangi susut pada jaringan distribusi primer area Luwuk walaupun tidak begitu signifikan, karena penambahan kapasitor bank hanya pada satu penyulang saja.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Tegangan Sebelum Dan Setelah Penambahan Kapasitor Bank



Gambar 5. Grafik Perbandingan Susut Daya Sebelum Dan Setelah Penambahan Kapasitor Bank

3.5. Rugi Energi Jaringan Distribusi Area Luwuk Sebelum dan Setelah Penambahan Kapasitor Bank

Setelah dilakukan simulasi aliran daya didapatkan nilai susut daya pada jaringan distribusi primer area Luwuk. Dengan demikian dapat dihitung rugi energi pada jaringan distribusi primer area Luwuk karena yang dijual oleh PLN ke konsumen adalah energi listrik. Besar rugi energi listrik pada jaringan distribusi primer area Luwuk sebelum penambahan kapasitor dalam 1 bulan adalah:

$$E_{loss} = P \times t = 605 \text{ kW} \times 720 \text{ h} = 435.600 \text{ kWh}$$

dan setelah penambahan kapasitor dalam 1 bulan adalah:

$$E_{loss} = P \times t = 591 \text{ kW} \times 720 \text{ h} = 425.520 \text{ kWh}$$

Untuk tarif dasar energi listrik PLN pada bulan Oktober – November 2020 diperlihatkan pada Tabel 9 berikut.

Apabila dilihat dari tarif energi listrik PLN, maka dapat dihitung kerugian PLN selama satu bulan akibat rugi energi listrik sebelum dilakukan penambahan kapasitor bank adalah $435.600 \text{ kWh} \times 1.444,70 = \text{Rp. } 629.311.320$, sedangkan rugi energi listrik setelah penambahan kapasitor bank adalah $425.520 \text{ kWh} \times 1.444,70 = \text{Rp. } 614.748.744$. Selisih rugi energi sebelum dan setelah penambahan kapasitor bank adalah Rp. 14.562.576 per bulan.

Tabel 9. Tarif dasar listrik PLN

| No | Gol. Tarif | Batas daya | Pra bayar (Rp/Kwh) |
|----|--------------|--------------------|--------------------|
| 1 | R-1/TR | 900 VA-RTM | 1.352.00 |
| 2 | R-1/TR | 1.300 VA | 1.444.70 |
| 3 | R-1/TR | 2.200 VA | 1.444.70 |
| 4 | R-2/TR | 3.500-5.500 VA | 1.444.70 |
| 5 | R-3/TR | 6.600 VA-ke atas | 1.444.70 |
| 6 | B-2/TR | 6.600 VA-200 kVA | 1.444.70 |
| 7 | B-3/TM | di atas 200 kVA | - |
| 8 | I-3/TM | di atas 200 kVA | - |
| 9 | I-4/TT | 30.000 kVA-ke atas | 1.444.70 |
| 10 | P-1/TR | 6.600 VA-200 kVA | 1.444.70 |
| 11 | P-2/TM | di atas 200 kVA | - |
| 12 | P-3/TR | - | 1.444.70 |
| 13 | L/TR, TM, TT | - | - |

Pendekatan penambahan kapasitor bank untuk menurunkan loss juga diperoleh pada penelitian lain, seperti [5],[24]. Dengan demikian, hasil penelitian ini memvalidasi efektivitas kapasitor bank untuk mereduksi loss pada jaringan, khususnya untuk jaringan terisolasi seperti kasus area Luwuk.

4. Kesimpulan

Hasil studi aliran daya menunjukkan terjadi susut daya aktif pada jaringan distribusi primer area Luwuk sebesar 605 kW dengan persentase susut 3,4% dan susut daya reaktif sebesar 576 kVAR dengan persentase sebesar 8,41% serta terjadi penurunan tegangan yang melampaui batas minimum tegangan pelayanan pada ujung penyulang Salodik yaitu -10,95%. Nilai susut ini sesuai dengan standar IEC sehingga dapat disimpulkan bahwa susut pada jaringan distribusi primer area Luwuk masih memenuhi toleransi dan penurunan tegangan pada ujung penyulang Salodik melampaui batas minimum tegangan pelayanan sesuai ketentuan SPLN. Dengan penambahan kapasitor bank sebesar 100 kVAR pada ujung penyulang Salodik, nilai penurunan tegangan pada penyulang tersebut berkurang dari -10,95% menjadi -7,85% sehingga telah memenuhi batas minimum tegangan pelayanan, dan terjadi penurunan susut daya aktif menjadi 591 kW dengan persentase 3,32% dan susut daya reaktif menjadi 555

kVAR dengan persentase 8,19%. Kerugian energi listrik mengalami penurunan sebesar Rp. 14.562.576 perbulan.

Sehingga apabila dalam satu tahun keuntungan dari berkurangnya rugi energi dari penambahan kapasitor bank mencapai Rp. 174.750.912. Selisih rugi energi tersebut jika dikumpulkan hingga masa pakai kapasitor bank pada jaringan tersebut habis (tidak efektif lagi), maka dapat digunakan untuk menambahkan dana untuk melakukan langkah perbaikan jaringan selanjutnya, seperti melakukan *uprating* penyulang atau pembuatan penyulang baru.

Penambahan kapasitor bank pada jaringan distribusi primer area Luwuk merupakan cara praktis yang dapat dilakukan dalam upaya perbaikan tegangan dan susut daya. Simulasi dalam penelitian ini mengasumsikan bahwa pembebanan relatif konstan. Namun, akan terjadi masalah apabila beban sistem berubah-ubah secara signifikan. Penambahan kapasitor bank juga dapat menyebabkan *over voltage* pada sistem apabila kapasitasnya melebihi yang dibutuhkan sistem. Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut menggunakan metode yang lebih antisipatif terhadap perubahan beban seperti Adaptive Newton Raphson.

Referensi

- [1]. Pakaya I., Basolle AW., Zulfatman Z. Optimasi Penempatan Recloser Pada Penyulang Olak Alen Untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi Menggunakan Algoritma Differential Evolution. *Transmisi*. 2021; 23(1): 14–20.
- [2]. Mardhatillah MF., Ervianto E. Analisa Rugi-rugi Daya Feeder Lobak Pada Jaringan PT . PLN (Persero) Area Pekanbaru. *Jom FTEKNIK*. 2017; 4(2): 1–10.
- [3]. Waluyo., Soenarjo., Akbar AA. Perhitungan Susut Daya Pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah Saluran Udara dan Kabel. *J Sains Dan Teknol EMAS*. 2007; 17(3): 169–82.
- [4]. Giu JD. Rekonfigurasi Optimal Sistem Distribusi Yang Terintegrasi Pembangkit Tersebar Terbarukan Menggunakan Algoritma Harmony Search. *J Teknol*. 2015; 8(1): 1–10.
- [5]. Hontong NJ., Tuegeh M., Patras lily S. Analisa Rugi - Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Di PT. PLN Palu. *E- Journal Tek Elektro Dan Komput*. 2015; 4(1): 64–71.
- [6]. Suprianto. Analisa Tegangan Jatuh pada Jaringan Distribusi 20 kV PT . PLN Area Rantau Prapat Rayon Aek Kota Batu. *J Electr Technol*. 2018; 3: 64–72.
- [7]. Markoni. Teori Dasar Teknik Tenaga Listrik. 2nd ed. Yogyakarta: Graha Ilmu. 2017.
- [8]. Indriyani R d., Harun EH., Mohamad Y. Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Sulawesi Utara dan Gorontalo Menggunakan Metode Fast Decoupled. *Jambura J Electr Electron Eng*. 2019; 1(1): 13–8.
- [9]. William D. Stevenson J. Analisis Sistem Tenaga Listrik. 4th ed. Jakarta: Erlangga. 1990.
- [10]. Harun EH. Analisis Tegangan Setiap Bus Pada Sistem Tenaga Listrik Gorontalo Melalui Simulasi Aliran Daya. *J Sainstek*. 2012; 6(6): 683–93.
- [11]. Pabla AS. Sistem Distribusi Daya Listrik. Jakarta: Erlangga. 2019.
- [12]. Harun EH. Analisis Kemampuan Pembangkit Sistem Tenaga Listrik Gorontalo Berdasarkan Simulasi Aliran Daya Menggunakan Matlab. *J Ilm Foristek*. 2014; 4(1): 323–33.
- [13]. Wahid., Mohamad Y., Tolango AI. Analisis Kualitas Tegangan Pada Jaringan Distribusi Sekunder Pada RSUD Prof. Dr. H. Aloei Saboe Kota Gorontalo. *J Tek*. 2016; 14(1): 69–76.
- [14]. Harun EH., Yusuf TI. *Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik 150 kV Gorontalo Menggunakan Metode Newton Raphson*. Gorontalo: Universitas Negeri Gorontalo; 2012.
- [15]. Tanjung A. Analisis Sistem Distribusi 20 kV Untuk Memperbaiki Kinerja Dan Keandalan Sistem Distribusi Menggunakan Electrical Transient Analysis Program. *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri (SNTIKI)*, vol. 4. Pekanbaru: Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sultan Syarif Kasim Riau; 2012. p. 391–9.
- [16]. Marniati Y. Evaluasi Susut Daya Penyulang Cendana 20 kV Pada Gardu Induk Bungaran Dengan ETAP 12.6. *J Tek Elektro ITP*. 2018; 7(1): 79–92. Doi: 10.21063/jte.2018.3133712.
- [17]. Mangundap J., Silimang S., Tumaliang H. Analisa Rugi-Rugi Daya Jaringan Distribusi Di PT. PLN (Persero) Area Manado 2017. *J Tek Elektro Dan Komput*. 2018; 7(3): 219–26.
- [18]. Hermawan R., Wardhani DUY. Analisis Rugi Daya Pada Penyulang Arwana Sebelum Dan Setelah Perbaikan Menggunakan Electrical Transient Analysis Program (Etap) 7.5.0 Di PT. PLN (Persero) Area Palembang. *J Desiminasi Teknol*. 2017; 5(2): 109–17. Doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [19]. Dani A., Hasanuddin M. *Perbaikan Faktor Daya Sebagai Kompensator Daya Reaktif (Studi Kasus STT Sinar Husni)*. Seminar Nasional Royal (SENAR). Sumut. 2018; 673–678.
- [20]. Ardiyanto F., Nugroho D., Hapsari P. Analisis Pemodelan Arus Transien Saat Switching Kapasitor Bank Pada Rumah Sakit Islam Sultan Agung Semarang. *Transmisi*. 2020; 22(4): 135–41.
- [21]. Kaur S., Singh A., Khela DRS. Load Flow Analysis of IEEE-3 bus system by using Mipower Software. *Int J Eng Res Technol*. 2015; 4(3): 9–16. Doi: 10.17577/ijertv4is030015.
- [22]. SPLN. 1:1995. *Tegangan-Tegangan Standar*. Jakarta. Departemen pertambangan dan energi perusahaan umum listrik negara. 1995.
- [23]. IEC. *Efficient Electrical Energy Transmission and Distribution*. International Electrotechnical Commission. 2007.
- [24]. Elchrisa, C., Amali, L.K. and Tolago, A.I. Analisis Optimasi Penempatan Kapasitor Bank pada Jaringan Tegangan Menengah 20kV Feeder IS. 03 Rayon Limboto untuk Memperbaiki Kualitas Tegangan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2019; 1(1), pp.25-31.