

**ANALISIS RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN TRANSMISI  
TEGANGAN TINGGI 150 KV GARDU INDUK BATANG –  
GARDU INDUK PEKALONGAN DENGAN JENIS  
KONDUKTOR ACCC LISBON**

**NASKAH PUBLIKASI TUGAS AKHIR**



Disusun oleh:  
**MOCHAMMAD AZIZURROHMAN**  
**5150711139**

**PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI DAN ELEKTRO  
UNIVERSITAS TEKNOLOGI YOGYAKARTA**

**YOGYAKARTA  
2019**

**HALAMAN PENGESAHAN  
NASKAH PUBLIKASI TUGAS AKHIR MAHASISWA**

Judul Tugas Akhir:

**ANALISIS RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN TRANSMISI  
TEGANGAN TINGGI 150 KV GARDU INDUK BATANG –  
GARDU INDUK PEKALONGAN DENGAN JENIS  
KONDUKTOR ACCC LISBON**

Judul Naskah Publikasi:

**ANALISIS RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN TRANSMISI  
TEGANGAN TINGGI 150 KV GARDU INDUK BATANG –  
GARDU INDUK PEKALONGAN DENGAN JENIS  
KONDUKTOR ACCC LISBON**

Disusun oleh:

**MOCHAMMAD AZIZURROHMAN**  
**5150711139**

Mengetahui,

<b>Nama</b>	<b>Jabatan</b>	<b>Tanda Tangan</b>	<b>Tanggal</b>
Wira Fadlun, S.T., M.Eng	Pembimbing	_____	_____

Naskah Publikasi Tugas Akhir ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi S-1 Teknik Elektro.

Yogyakarta, ..... 2019

Menyetujui,

Ketua Program Studi S-1 Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Informasi dan Elektro Universitas Teknologi Yogyakarta

**M.S. Hendriyawan Achmad, S.T., M.Eng.**

NIK. 110810056

## PERNYATAAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mochammad Azizurrohman  
NIM : 5150711139  
Program Studi : S-1 Teknik Elektro  
Fakultas : Teknologi Informasi dan Elektro

Menyatakan bahwa Naskah Publikasi Tugas Akhir dengan judul:

**“Analisis Rugi-Rugi Daya Salutan Transmisi Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Batang – Gardu Induk Pekalongan Dengan Jenis Konduktor ACCC Lisbon”**

ini hanya akan dipublikasikan di JURNAL TeknoSAINS FTIE UTY dan tidak akan dipublikasikan di jurnal orang lain.

Demikian surat pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya.

Yogyakarta, ..... 2019  
Penulis,

Mochammad Azizurrohman  
5150711139

# ANALISIS RUGI-RUGI DAYA PADA SALURAN TRANSMISI TEGANGAN TINGGI 150 KV GARDU INDUK BATANG – GARDU INDUK PEKALONGAN DENGAN JENIS KONDUKTOR ACCC LISBON

<sup>1</sup> Mochammad Azizurrohman, <sup>2</sup> Wira Fadlun

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Informasi dan Elektro

Universitas Teknologi Yogyakarta

Jl. Siliwangi, Ringroad Utara Jombor Sleman Yogyakarta

E-mail : [yyur75@gmail.com](mailto:yyur75@gmail.com), [wira.fadlun@staff.uty.ac.id](mailto:wira.fadlun@staff.uty.ac.id)

## ABSTRAK

Menghadapi era industri 4.0 sekarang ini kebutuhan tenaga listrik di Indonesia terus meningkat, energi listrik yang semakin meningkat, mensyaratkan ketersediaan energi listrik yang efisien dan berkualitas. Efisien berarti daya yang dibangkitkan dapat didistribusikan secara maksimal kepada konsumen tanpa kehilangan daya seperti pada sistem jaringan maupun peralatan listrik. Rugi-rugi daya terjadi karena beberapa faktor antara lain faktor korona, kebocoran isolator dan jenis atau konduktor yang dipakai untuk mentransmisikan energi listrik sehingga mengakibatkan tegangan juga mengalami penurunan atau biasa disebut dengan *drop* tegangan, untuk mengurangi kerugian daya yang begitu besar maka PT. PLN melakukan rekonduktoring dengan jenis konduktor ACCC Lisbon menggantikan konduktor sebelumnya jenisnya adalah ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> dimana konduktor jenis ACCC Lisbon ini memiliki kemampuan hantar arus yang lebih besar. Pada penelitian ini dilakukan analisis rugi-rugi daya saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV Batang – Pekalongan, dimana pada analisa ini dilakukan dengan cara memantau dan mencatat nilai-nilai arus, tegangan dan daya pada panel trafo pukul 10.00 WIB dan 19.00 WIB, kemudian data tersebut digunakan untuk mencari nilai rugi-rugi daya dan selanjutnya akan dibandingkan dengan hasil analisis perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$ . Rugi-rugi daya bulan Juli 2018 untuk jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> yaitu sebesar 11,67057805 MW dan untuk jenis konduktor ACCC Lisbon yaitu sebesar 4,209515808 MW. Rugi rupiah selama satu bulan yang ditanggung PLN akibat daya yang hilang sebesar Rp. 312.948.884,48 untuk jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> sedangkan kerugian pada jenis konduktor ACCC Lisbon sebesar Rp. 112.879.008,28. Untuk nilai rata-rata efisiensi saluran transmisi untuk jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> sebesar 99,39%. Sedangkan nilai rata-rata efisiensi transmisi jenis konduktor ACCC Lisbon pada sebesar 99,62%. Diperoleh daya pengiriman dan penerimaan menggunakan metode perhitungan nominal  $\pi$  dengan rata-rata daya kirim dan terima selama satu bulan dari hasil perhitungan diperoleh daya rata-rata untuk jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> pada sisi pengirim sebesar  $P_S = 49,67 \text{ MW}$  dan hasil perhitungan menggunakan nominal  $\pi$  sisi terima sebesar  $P_R = 50,86 \text{ MW}$  dengan selisih *error* sebesar 2,33%. Untuk jenis penghantar ACCC Lisbon diperoleh nilai daya rata-rata pengirim sebesar  $P_S = 33,36 \text{ MW}$  dan untuk hasil perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$  daya sisi terima sebesar  $P_R = 31,71 \text{ MW}$  dengan selisih *error* sebesar -4,94%. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$  dapat digunakan untuk mencari nilai rugi-rugi daya tegangan, arus dan daya. Susut tegangan perkilometer untuk konduktor ACSR sebesar 31,81 V, ACCC Lisbon sebesar 8,70 V dan untuk ACCC 1000 sebesar 2,16 V dan susut daya perkilometer untuk konduktor ACSR sebesar 12,86 MW, untuk jenis ACCC Lisbon sebesar 9,61 MW dan untuk ACCC 1000 sebesar 3,11 MW.

**Kata Kunci :** Rugi Daya, Efisiensi Transmisi, Metode Nominal  $\pi$ , ACCC Lisbon, ACSR

## 1. PENDAHULUAN

Menghadapi Era Industri 4.0 sekarang ini kebutuhan tenaga listrik di Indonesia terus meningkat, energi listrik yang semakin meningkat, mensyaratkan ketersediaan energi listrik yang efisien dan berkualitas. Efisien berarti daya yang dibangkitkan dapat didistribusikan secara maksimal kepada konsumen tanpa kehilangan seperti pada sistem jaringan maupun peralatan listrik.

Sistem kelistrikan antar pusat pembangkit dan pusat beban pada umumnya terpisah dalam ratusan bahkan ribuan kilometer. Hal ini terjadi karena beban (konsumen) terdistribusi di setiap tempat, sementara lokasi pembangkitan umumnya terletak di pusat sumber energi (PLTA) dan di lokasi yang memudahkan transportasi bahan bakar (PLTU), yang biasanya dibangun di tepi laut.

Rugi-rugi daya terjadi karena beberapa faktor yaitu faktor korona, kebocoran isolator, jarak serta jenis penghantar atau konduktor yang dipakai untuk mentransmisikan energi listrik, yang biasanya banyak terjadi pada saluran transmisi tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi, sehingga mengakibatkan tegangan mengalami penurunan atau biasa disebut dengan jatuh tegangan dan rugi daya.

Rugi daya yang terjadi pada saluran transmisi sangat perlu diperhatikan, karena bisa menyebabkan hilangnya daya yang cukup besar. Kekurangan pasokan listrik pada suatu daerah akan mengakibatkan tegangan rendah bahkan bisa menyebabkan pemadaman listrik.

Jenis konduktor yang sering dipakai pada saluran transmisi 150 kV adalah jenis ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) yang mana kemampuan hantar arusnya bisa mencapai 638 Ampere, akan tetapi seiring bertambahnya beban energi listrik, konduktor jenis ACSR ini memiliki rugi-rugi yang dapat mempengaruhi penransmisi daya yaitu mudah terjadi korosi pada inti baja serta memiliki konduktivitas DC yang rendah, meskipun harga konduktor jenis ini murah dan daya regangnya sangat kuat tetapi dalam transmisi energi listrik kuat daya regang dan murah belum cukup untuk menekan rugi-rugi daya yang dihasilkan. Untuk mengurangi rugi-rugi daya yang begitu besar maka PT. PLN melakukan rekonduktoring dengan jenis ACCC Lisbon yang mana konduktor jenis ini memiliki kemampuan hantar arus sebesar 1285 Ampere dengan keuntungan menghantarkan arus listrik dua kali lipat lebih besar dari ACSR dan mampu menahan suhu panas listrik serta mempunyai konduktivitas yang tinggi.

Pada penelitian kali ini penulis melakukan penelitian tentang analisis perhitungan besarnya daya listrik yang ditransmisikan dengan menggunakan metode perhitungan nominal  $\pi$  supaya rugi-rugi daya

pada saluran transmisi dapat diketahui dan rugi-rugi yang ditanggung perusahaan tidak terlalu besar sehingga dapat menjadikan sistem lebih baik lagi.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Berdasarkan penelitian sebelumnya Penelitian oleh Ghofur Barum Kosasih (2017), tentang “Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi Tegangan Tinggi 150 KV Pada Gardu Induk Jajar-Gondangrejo”. Pada penelitian ini membahas rugi-rugi daya dengan memantau panel dan mencatat besarnya arus, tegangan serta beban, pemantauan dan pencatatan dilakukan pada jam-jam tertentu. Dari hasil pencatatan selama kurun waktu satu bulan dan dengan melalui perhitungan manual didapatkan hasil, bahwa rugi-rugi daya tertinggi terjadi sebesar 1,035619 MW dan 1,398591 MW.

Penelitian kedua oleh Asri Akbar, Surya Tarmizi Kasim (2015), tentang “Analisis Perhitungan Rugi-rugi Daya Pada Gardu Induk PLTU 2 Sumut Pangkalan Susu Dengan menggunakan Simulasi Electrical Transient Analyzer”. Penelitian ini menghitung rugi daya menggunakan metode iterasi *Newton Rapshon* dan hasilnya rugi-rugi daya aktif tertinggi sebesar 106.1 kw dan rugi-rugi daya reaktif tertinggi sebesar 1882.6 kw.

Penelitian ketiga oleh Muhammad Radil, Riad Syech, Sugianto (2014), tentang “Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Penghantar Saluran Transmisi Tegangan Tinggi 150 KV Dari Gardu Induk Koto Panjang Ke Gardu Induk Garuda Sakti Pekanbaru”. Pada penelitian ini penulis mendapatkan data rugi-rugi dan didapatkan hasil, daya hantar total terbesar adalah 43.645.705,993 Watt dan 37.313.100,282 Watt dengan rugi daya sebesar 4435,645 MW.

Penelitian keempat oleh Didik Aribowo, Desmira (2016), tentang “Analisis Kerugian Daya Pada Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 KV Unit Pelayanan Transmisi Cilegon Baru – Cibinong”. Pada penelitian ini mencari rugi daya dengan menghitung besarnya reaktansi, besarnya nilai GMD dan GMR, menghitung faktor korona dan mencari besarnya nilai efisiensi transmisi, didapatkan hasil rugi-rugi daya yang terjadi yaitu sebesar 13.290.306,78 Watt, Efisiensi transmisi hampir mendekati 100 % yaitu 98,41% dan 98,32%,

Penelitian kelima oleh Shahlan Hariyadi (2018), tentang “Analisis Rugi-Rugi Daya dan Jatuh Tegangan Pada Saluran Transmisi Tegangan Tinggi 150 KV Pada Gardu Induk Palur-Masaran”. Penelitian ini mencari rugi-rugi daya dengan mencari resistansi total pada penghantar, menghitung daya yang hilang pada penghantar RST, menghitung rugi-rugi biaya dan menghitung jatuh tegangan dari pengiriman hingga penerima. Hasilnya resistansi jenis penghantar ACSR

240/40 adalah 0,119  $\Omega$ /Km. Total rugi – rugi daya mencapai 384.025 kW dan mengalami rugi-rugi mencapai Rp.434.716.300.

### 3. LANDASAN TEORI

#### 3.1 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam rangkaian listrik.

##### a. Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya, daya aktif atau daya nyata dirumuskan dengan  $S \cos \theta$  atau  $V \cdot I$ . Persamaan daya aktif dapat dilihat pada Persamaan 3.1 dan Persamaan 3.2.

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (3.1)$$

Persamaan di atas untuk menghitung daya aktif satu fasa, sedangkan persamaan untuk tiga fasa adalah :

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta \cdot \sqrt{3} \quad (3.2)$$

Dimana:

$$P = \text{Daya Aktif (Watt)}$$

$$V = \text{Tegangan Listrik (Volt)}$$

$$I = \text{Arus Listrik (Ampere)}$$

$$\cos \theta = \text{Faktor Daya}$$

##### b. Daya Reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet, dari pembentukan medan magnet, lihat pada Persamaan 3.3 dan Persamaan 3.4.

Untuk menghitung daya reaktif satu fasa

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (3.3)$$

Sedangkan persamaan untuk tiga fasa adalah :

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{3} \quad (3.4)$$

##### c. Daya Semu

Voltampere sama dengan  $V \cdot I$  dan daya nyatanya adalah  $V \cdot I \cdot \cos \theta$ . Dapat dilihat pada Persamaan 3.5.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.5)$$

Dimana:

$$P = \text{Daya Aktif (Watt)}$$

$$S = \text{Daya Semu (VA)}$$

$$Q = \text{Daya Reaktif (VAR)}$$

##### d. Faktor Daya

Faktor Daya yang dinotasikan sebagai  $\cos \phi$  didefinisikan sebagai perbandingan antara arus yang dapat menghasilkan kerja didalam suatu rangkaian terhadap arus total yang masuk.. Faktor daya ditunjukkan oleh Persamaan 3.6.

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \quad (3.6)$$

#### 3.2 Resistansi Kawat Penghantar

Besarnya nilai resistansi atau hambatan pada setiap jenis penghantar berpengaruh terhadap besarnya daya yang dapat mengalir dalam penghantar tersebut.

Persamaan 3.7 digunakan untuk menghitung resistansi penghantar:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.7)$$

Dimana:

$$\rho = \text{Resistivitas } (\Omega)$$

$$R = \text{Resistansi } (\Omega/m)$$

$$l = \text{Panjang Penghantar (m)}$$

$$A = \text{Luas Penampang (m}^2\text{)}$$

Untuk mencari resistansi total penghantar dengan menghitung jarak jauh penghantar dari GI Batang sampai GI Pekalongan digunakan Persamaan 3.8 resistansi total.

$$R_{Total} = R \times l \quad (3.8)$$

Dimana:

$$R = \text{Resistansi Jenis Penghantar } (\Omega)$$

$$l = \text{Panjang atau Jarak Penghantar (m)}$$

#### 3.3 Perhitungan GMR, GMD, Induktansi dan Kapasitansi

##### a. Radius rata-rata geometris (GMR)

Radius rata-rata geometris (GMR) dari suatu kawat bundar adalah radius dari suatu silinder ber dinding sangat tipis mendekati nol. Untuk menghitung GMR dapat menggunakan Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10.

$$GMR = \sqrt[4]{(r' \cdot D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{ad} \dots \dots D_{an})} \quad (3.9)$$

$$r' = r e^{-\frac{1}{4}} \quad (3.10)$$

##### b. Jarak rata-rata geometris (GMD)

Dapat dicari menggunakan Persamaan 3.11.

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}} \quad (3.11)$$

##### c. Induktansi Saluran

Induktansi kawat tiga fasa umumnya berlainan untuk masing – masing kawat. Dapat dicari menggunakan Persamaan 3.12 dan Persamaan 3.13.

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \quad (3.12)$$

$$X_L = 2\pi f L \quad (3.13)$$

##### d. Kapasitansi Saluran

Kapasitansi adalah kemampuan dua konduktor yang dipisahkan oleh isolator untuk menyimpan muatan listrik. Dapat dicari dengan Persamaan 3.14 dan Persamaan 3.15.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (3.14)$$

$$Y = j2\pi f C \quad (3.15)$$

Dimana:

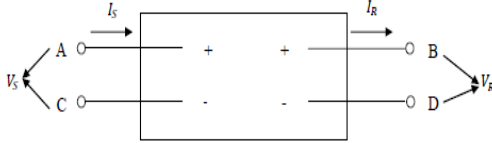
r = Jari-jari penghantar

C = Kapasitansi

Y = Admitansi

### 3.4 Rangkaian Empat Katub

Dalam banyak keperluan didalam teknik transmisi daya listrik, diagram-diagram lingkaran, perencana saluran transmisi dan lain-lain, perlu menyatakan konstanta-konstanta saluran transmisi kedalam konstanta-konstanta umum saluran, sebagai mana terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Rangkaian Katub Empat

A, B, C, D adalah konstanta konstanta umum dari rangkaian itu, dapat dicari melalui Persamaan 3.16 sampai Persamaan 3.19.

$$V_S = AV_R - BI_R \quad (3.16)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (3.17)$$

$$V_R = DV_S - BI_S \quad (3.18)$$

$$I_R = -CV_S + AI_S \quad (3.19)$$

Dimana:

Z = Impedansi (ohm)

Y = Admitansi (Mho)

V<sub>S</sub> = Tegangan Pada Sisi Pengirim (Volt)

V<sub>R</sub> = Tegangan Pada Sisi Penerima (Volt)

I<sub>S</sub> = Arus Pada Sisi Pengirim (Ampere)

I<sub>R</sub> = Arus Pada Sisi Penerima (Ampere)

ABCD = Konstanta

Konstanta A, B, C, D saluran transmisi jarak pendek yang telah ditetapkan:

$$A = 1 \quad B = Z \quad C = 0 \quad D = 1$$

### 3.5 Rugi Daya Saluran Transmisi

Rugi-rugi daya pada saluran transmisi pasti terjadi di tiap fasa RST saluran transmisi 150 kV, besarnya pembagian pembebanan daya tiap fasa juga berbeda-beda. Didapatkan persamaan rugi-rugi daya dapat dilihat pada Persamaan 3.20 sampai Persamaan 3.22.

Persamaan mencari rugi daya untuk 1 fasa sebagai berikut:

$$P_{Losses} = I^2 \cdot R_{Total} \quad (3.20)$$

Persamaan mencari rugi daya untuk 3 fasa sebagai berikut:

$$P_{Losses} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{Total} \quad (3.21)$$

Persamaan mencari rugi daya perhari sebagai berikut:

$$P_{Losses} \text{ perhari} = \frac{P_{t1} + P_{t2} + P_{tn}}{2} \quad (3.22)$$

Dimana :

$P_{Losses}$  = Rugi - rugi Daya Perfasa (Watt)

I = Arus Saluran Perfasa (Ampere)

R = Resistansi Total Saluran ( $\Omega$ )

t = Waktu (Jam)

Untuk mencari daya pengiriman pada saluran transmisi dapat dicari dengan Persamaan 3.23.

$$P_S = P_R + P_{Rugi \text{ total}} + P_{Rugi \text{ korona}} \quad (3.23)$$

Dimana:

$P_R$  = Daya yang diterima (kW)

$P_S$  = Daya yang dikirim (kW)

### 3.6 Proses Terjadinya Korona

Bila dua kawat sejajar yang luas penampangnya kecil dibandingkan dengan jarak antar kawat tersebut diberikan tegangan tinggi bolak balik, maka akan terjadi fenomena korona. Untuk menghitung rugi korona dapat menggunakan Persamaan 3.24.

$$P_{Korona} = \frac{A}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (V - V_d)^2 10^{-5} \quad (3.24)$$

Dimana:

f = Frekuensi (Hz)

V = Tegangan Fasa ke Netral (kVrms)

A = 0,448 untuk kawat padat dan 0,375 untuk l

m = m<sub>0</sub> - m<sub>1</sub>

$\delta$  = Kerapatan Udara

r = Jari - jari penghantar

V<sub>d</sub> = Tegangan Diskruptif Kritis (kVrms)

Kerapatan udara adalah faktor yang perlu di hitung sebagai pengaruh dari cuaca yang ada pada objek penelitian. adapun rumus dari faktor kerapatan udara adalah menggunakan Persamaan 3.25.

$$\delta = \frac{0,289 \cdot b}{273 + t} \quad (3.25)$$

Dimana:

b = Tekanan Udara (mBar)

t = Suhu ( $^{\circ}C$ )

Tegangan disruptif kritis didefinisikan sebagai tegangan dimana kerusakan dielektrik terjadi dengan sempurna.

$$V_d = E_m \cdot \delta \cdot m_0 \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r} \quad (3.26)$$

Dimana:

$E_m$  = Kuat medan di permukaan penghantar k

= 21,1 kondisi cuaca baik

= 16,9 kondisi cuaca buruk

D = Jarak antar kawat fasa (cm)

### 3.7 Efisiensi Transmisi

Efisiensi (daya guna) dari saluran transmisi adalah perbandingan antara daya yang diterima dengan daya yang dikirimkan ke beban dapat dirumuskan pada Persamaan 3.27.

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \times 100 \% \quad (3.27)$$

### 3.8 Energi Listrik

Energi listrik dapat diketahui dengan mencari besarnya daya pemakaian serta lama pemakaian

perharinya. Dapat dicari menggunakan Persamaan 3.28 dan Persamaan 3.29.

$$E = P \times t \quad (3.28)$$

Dimana :

$$E = \text{Energi Listrik} \left( \frac{\text{Watt}}{\text{Jam}} \right)$$

$$P = \text{Daya Listrik (Watt)}$$

$$t = \text{Waktu (Jam)}$$

$$\text{Biaya Listrik} = (E \times 1000) \times \text{TDL} \quad (3.29)$$

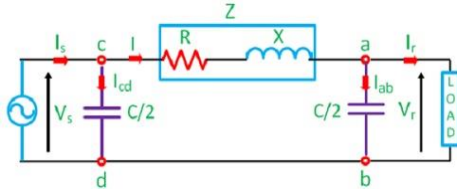
Dimana :

$$\frac{E}{1000} = \text{Pemakaian Listrik (kWh)}$$

$$\text{TDL} = \text{Tarif Dasar Listrik (Rp)}$$

### 3.9 Metode Nominal $\pi$

Metode nominal  $\pi$  adalah perhitungan yang dapat digunakan untuk mencari selisih arus ( $I$ ), tegangan ( $V$ ) dan daya dari pengiriman ( $P_S$ ) ke penerima ( $P_R$ ) dengan mencari besarnya nilai-nilai impedansi ( $Z$ ), admitansi ( $Y$ ) dan kapasitansi ( $C$ ). Rangkaian yang terbentuk dinamakan suatu  $\pi$  nominal dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Metode Nominal  $\pi$

(Sumber: <https://google.photos.com/>. 2019)

Dari gambar di atas dapat kita peroleh Persamaan 3.30 samapi Persamaan 3.32.

$$V_S = (1 + Y_R Z) I_R \quad (3.30)$$

$$I_S = (Y_S + Y_R + Y_S Z Y_R) V_R + (1 + Y_S Z) I_R \quad (3.31)$$

$$\text{Cos}_R = \text{Cos}_{V_R} - \text{Cos}_{I_R} \quad (3.32)$$

Persamaan di atas dapat diuraikan menjadi konstanta ABCD:

$$A = (1 + Y_R Z)$$

$$B = 1$$

$$C = (Y_S + Y_R + Y_S Z Y_R)$$

$$D = (1 + Y_S Z)$$

Maka persamaan konstanta ABCD dapat didapat sebagai berikut:

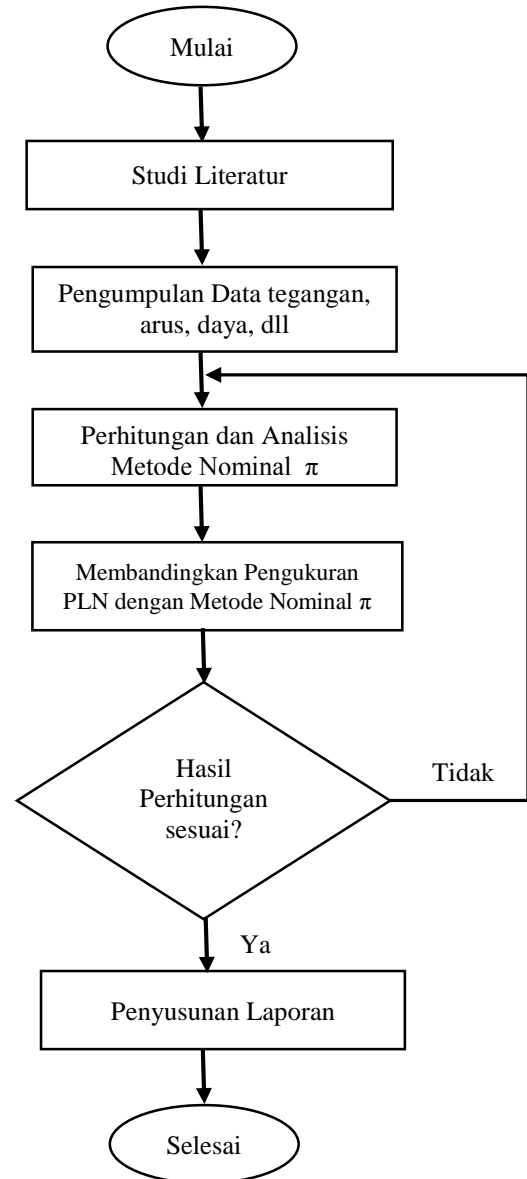
$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} \quad (3.33)$$

$$B = Z \quad (3.34)$$

$$C = Y + \frac{Y^2 Z}{4} \text{ atau } Y \left( 1 + \frac{YZ}{4} \right) \quad (3.35)$$

## 4. METODOLOGI PENELITIAN

### 4.1 Flowchart Penelitian



Gambar 4.1 Flowchart Penelitian

Berdasarkan Gambar 4.1 langkah-langkah dalam melakukan penelitian dapat diuraikan sebagai berikut:

#### 1. Studi Literatur

Metode studi literatur adalah metode untuk mendapatkan informasi terkait judul penelitian dengan merujuk pada referensi yang telah ada baik berupa buku, jurnal ataupun penelitian yang sudah pernah dilakukan terkait sistem transmisi tenaga listrik, rugi-rugi daya saluran transmisi dll.

#### 2. Pengumpulan Data

Pada tahapan ini terdapat pengumpulan dan pengambilan data yang digunakan antara lain:



- 1) Data beban penghantar transmisi pada Gardu Induk 150 kV.
- 2) Data jarak GI Batang sampai GI Pekalongan.
- 3) Data diambil pada puncak beban pukul 10.00 dan 19.00 WIB dengan memantau dan mencatat kondisi beban melalui panel yang terdapat di GI Pekalongan.
- 4) Data spesifikasi peralatan yang ada di GI Pekalongan.

### 3. Perhitungan dan Analisis

Setelah semua data yang diperlukan telah didapatkan maka selanjutnya dilakukan perhitungan dan analisis data mulai dari perhitungan rugi-rugi daya, besarnya arus dan tegangan yang dihasilkan. Kemudian hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan metode nominal  $\pi$ . Dimana pada metode ini semua data yang didapat dari hasil perhitungan beban melalui panel dapat diketahui berapa besar selisihnya.

#### 4. Penyusunan Laporan

Pengolahan hasil dari analisis data yang sudah didapatkan setelah melaksanakan penelitian untuk disusun sebagai laporan akhir Penelitian.

## 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Data Pengukuran di GI Pekalongan

Data diambil pada bulan Juli 2018, pengambilan data dilakukan pada beban puncak di pagi hari yaitu pada jam 10:00 WIB dan beban puncak malam hari pada jam 19:00 WIB. Pada Tabel 5.1 dan Tabel 5.2 variabel R, S dan T merupakan arus fasa R, S dan T berturut-turut dalam satuan ampere.

Tabel 5.1 Data Beban Puncak Bulan Juli 2018 Jenis Konduktor ACSR

Tgl	Pukul 10:00					Pukul 19:00				
	R	S	T	P	Q	R	S	T	P	Q
1	270	280	280	63	10	420	450	450	102	15
2	300	310	310	71	12	420	450	450	101	13,6
3	270	280	290	63	11,1	400	420	440	95	11,6
4	250	270	280	58	8	390	430	430	93	7
5	240	260	260	57	8	200	200	200	51	1,2

Tabel 5.2 Data Beban Puncak Bulan Juli 2018 Jenis Konduktor ACCC Lisbon

Tgl	Pukul 10:00					Pukul 19:00				
	R	S	T	P	Q	R	S	T	P	Q
1	110	120	120	28	2	180	180	200	47	3
2	150	160	161	37	10	180	190	190	47	2
3	140	160	140	34,2	13,4	180	200	200	48,3	2,8
4	90	100	100	21	5	170	170	180	45	3
5	140	140	140	34	6	130	140	140	32	7

### 5.1.1 Perhitungan Rugi-rugi Daya

- 1) Persamaan untuk mencari besarnya resistansi konduktor .

$$R_{Total} ACSR = R \times l \quad \left| \quad R_{Total} ACCC = R \times l \right.$$

$$= 0,1183 \Omega \times 20,405 \text{ km} \quad \left| \quad = 0,0888 \Omega \times 20,405 \text{ km} \right.$$

$$= 2,4139115 \Omega \quad \left| \quad = 1,811964 \Omega \right.$$

- 2) Mencari rugi-rugi daya ( $P_{Losses}$ ) pada tiap fasa RST saluran transmisi tegangan tinggi GI Batang – GI Pekalongan.

$$P_{Losses} = I^2 \cdot R_{Total}$$

- a) Data beban puncak pada pukul 10.00 bulan Juli 2018 dengan jenis konduktor ACSR. Tanggal 1 Juli 2018:

$$P_{Losses} R = 270^2 \cdot 2,4139 = 175.974,14835 \text{ Watt}$$

$$P_{Losses} S = 280^2 \cdot 2,41391 = 189.250,6616 \text{ Watt}$$

$$P_{Losses} T = 280^2 \cdot 2,41391 = 189.250,6616 \text{ Watt}$$

- b) Data beban puncak pada pukul 19.00 bulan Juli 2018 dengan jenis konduktor ACSR. Tanggal 1 Juli 2018:

$$P_{Losses} R = 420^2 \cdot 2,41391 = 425.813,9886 \text{ Watt}$$

$$P_{Losses} S = 450^2 \cdot 2,41391 = 488.817,07875 \text{ Watt}$$

$$P_{Losses} T = 450^2 \cdot 2,41391 = 488.817,07875 \text{ Watt}$$

- 3) Mencari rugi-rugi daya tiga fasa bulan Juli 2018 pukul 10.00 penghantar ACSR 240/40 mm<sup>2</sup>. Tanggal 1 Juli 2018:

$$P_{Losses} RST = 425.813,98 + 488.817,07 + 488.817$$

$$= 1.403.448,1461 \text{ Watt}$$

$$= 1,403448 \text{ MW}$$

- 4) Mencari rugi-rugi daya tiga fasa bulan Juli 2018 pukul 19.00 konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup>. Tanggal 1 Juli 2018:

$$P_{Losses} RST = 175.974 + 189.250 + 189.250$$

$$= 554.475,47155 \text{ Watt}$$

$$= 0,554475 \text{ MW}$$

- 5) Menentukan rugi-rugi daya perhari pada jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> sebagai berikut:

$$P_{Losses} \text{ Tanggal 1} = \frac{P_{10.00} + P_{19.00}}{2}$$

$$= \frac{(0,554475 + 1,403448)}{2}$$

$$= 0,9789615 \text{ MW}$$

$$W_{Losses} \text{ Tanggal 1} = P \times t$$

$$= 0,9789615 \times 24 \text{ Jam}$$

$$= 23,495076 \text{ MWh}$$

- 6) Menghitung rugi-rugi daya konduktor ACSR oleh faktor korona adalah sebagai berikut:  
Nilai-nilai parameter saluran transmisi terdapat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Parameter Saluran Transmisi 150 kV GI Batang – GI Pekalongan

Parameter	Nilai
Tegangan Transmisi	150 kV
Frekuensi	50 Hz
Jarak Antar Fasa	4 meter
Diameter Konduktor ACSR / ACCC	21,84 / 21,78 mm
Jari-jari Konduktor ACSR / ACCC	10,92 / 10,89 mm
Kuat Medan Kondisi Kering	21,1 kV
Suhu	27,2 °C
$V_{(L-N)}$	86,70 kV

$$P_{Korona} = \frac{A}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (V - V_d)^2 10^{-5}$$

$$= \frac{0,375}{0,725} (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{10,92}{5,039}} (86,7 - 96,098)^2 10^{-5}$$

$$= 0,517 \times 75 \times 2,167 \times 88,322 \times 10^{-5}$$

$$= 2.421,252 \times 10^{-5} \text{ kW/km}$$

$$= 0,074212 \text{ kW/km}$$

$$= 74,212 \text{ W/km} \times 20,405 \text{ km} = 1.514,255 \text{ Watt}$$

7) Untuk mencari besarnya kerapatan udara dapat adalah sebagai berikut:

$$\delta = \frac{0,289 \cdot b}{273 + t}$$

$$= \frac{0,289 \cdot 753,81}{273 + 27,2} = \frac{217,85}{300,2} = 0,725$$

### 5.1.2 Rugi-rugi Energi dalam Rupiah

Menentukan rugi-rugi energi yang hilang pada saluran transmisi 150 kV, untuk tarif dasar listrik tahun 2018 disajikan dalam Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Tarif Dasar Listrik Tahun 2018

No.	Golongan Tarif Daya	Keterangan	Tarif Dasar Listrik
1.	450 VA	Subsidi	Rp. 415 /kWh
2.	900 VA	Subsidi	Rp. 605 /kWh
3.	900 VA	Non Subsidi	Rp. 1352 /kWh
4.	1300 VA	Non Subsidi	Rp. 1467,28 /kWh
5.	2200 VA	Non Subsidi	Rp. 1467,28 /kWh
6.	3500 – 5500 VA	Non Subsidi	Rp. 1467,28 /kWh
7.	6600 – 220 kVA	Non Subsidi	Rp. 1467,28 /kWh
RATA-RATA			Rp. 1177,30 /kWh

- 1) Menentukan besarnya rugi-rugi energi listrik yang hilang jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup>:  
*Tarif Listrik Tanggal 1 = (W x 1000) x TDL*  
 $= (23,495076 \times 1000) \times 1177,30$   
 $= \text{Rp. } 27.660.752,97$

### 5.1.3 Efisiensi Transmisi

Efisiensi transmisi dapat diketahui dengan cara mencari berapa besar daya kirim dan daya terima.

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \times 100 \%$$

Efisiensi transmisi Tanggal 1 Juli 2018 pukul 10.00 konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup>:

$$= \frac{63.000.000}{63.558.186,1} \times 100 \%$$

$$= 99,12 \%$$

Tanggal 1 Juli 2018 pukul 19.00 konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup>:

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \times 100 \%$$

$$= \frac{102.000.000}{103.405,918} \times 100 \%$$

$$= 98,6 \%$$

Sebelum menentukan efisiensi saluran transmisi dengan jenis konduktor ditentukan terlebih dahulu daya pengiriman sebagai berikut:

Tanggal 1 Juli 2018 pukul 10.00:

$$P_S = P_R + P_{Rugi \text{ total}} + P_{Rugi \text{ korona}}$$

$$= 63.000.000 + 555.715,9 + 2.470,2293$$

$$= 63.558.186,1 \text{ Watt}$$

Tanggal 1 Juli 2018 pukul 19.00:

$$P_S = P_R + P_{Rugi \text{ total}} + P_{Rugi \text{ korona}}$$

$$= 102.000.000 + 1.403.448 + 2.470,2293$$

$$= 103.405.918 \text{ Watt}$$

### 5.1.4 Perhitungan Menggunakan Metode Nominal $\pi$

Metode nominal  $\pi$  adalah perhitungan yang dapat digunakan untuk mencari selisih arus (I), tegangan (V) dan daya dari pengiriman ( $P_S$ ) ke penerima ( $P_R$ ) dengan mencari besarnya nilai-nilai impedansi (Z), admitansi (Y) dan kapasitansi (C) serta persamaan-persamaan lainnya.

Mencari impedansi saluran transmisi sebagai berikut:

$$Z = zl = (r + jx) = R + jX$$

$$= R + j\omega L$$

$$= R + j2\pi fL$$

$$= 0,0887 + j2 \times 3,14 \times 50 \times 1,119 \times 10^{-4}$$

$$= 0,0887 + j0,035$$

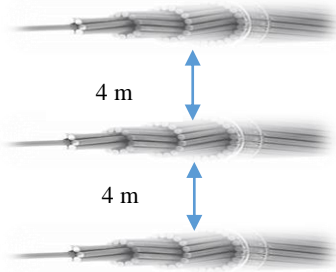
$$= 0,095 < 21,53^\circ \times 20,405$$

$$= 1,938 < 21,53^\circ \text{ ohm}$$

Sebelum mencari impedansi saluran terlebih dahulu mencari besarnya nilai induktansi jenis ACCC Lisbon sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 L &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \\
 &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{5,0396}{0,009} \\
 &= 2 \times 10^{-7} \times 559,95 \\
 &= 1,119 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Untuk mencari nilai GMD dan GMR dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:



Gambar 4.2 Jarak Antar Kawat Penghantar

$$\begin{aligned}
 GMD &= \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}} \\
 &= \sqrt[3]{4 \times 4 \times 8} \\
 &= \sqrt[3]{128} = 5,0396 \text{ m}
 \end{aligned}$$

GMR untuk jenis konduktor ACCC Lisbon yaitu sebesar 0,009 meter. mencari besarnya admitansi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Y &= j\omega C \\
 &= j2\pi f C \\
 &= j2 \times 3,14 \times 50 \times 8,787 \times 10^{-6} \\
 &= 2,759 \times 10^{-3} \\
 &= 2,759 \times 10^{-3} \times 20,405 \\
 &= 0,0562 < 90^\circ \text{ mho/km}
 \end{aligned}$$

Nilai reaktansi kapasitif untuk konduktor jenis ACCC Lisbon sebesar 0,191 persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln GMD/GMR} \\
 &= \frac{2 \times 3,14 \times 8,854 \times 10^{-6}}{6,327} \\
 &= 8,787 \times 10^{-6} \mu F
 \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan nilai-nilai impedansi dan admitansi kemudian mencari koefisien ABCD sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 A &= 1 + \frac{ZY}{2} \\
 &= 1 + \frac{1,938 < 21,53^\circ \times 0,0562 < 90^\circ}{2} \\
 &= 1 + (0,0544 < 111,53^\circ) \\
 &= 1 + (-0,01996 + j0,05060) \\
 &= 0,980 + j0,050 \\
 &= 0,981 < 2,95^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C &= 1 + \frac{YZ}{4} \\
 &= 1 + \frac{1,938 < 21,53^\circ \times 0,0562 < 90^\circ}{4}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 + (0,0272 < 111,53^\circ) \\
 &= 1 + (-0,00998 + j0,0253) \\
 &= 0,9902 + j0,0253 \\
 &= 0,99 < 1,46^\circ
 \end{aligned}$$

Besarnya masing-masing parameter A, B, C dan D di atas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} = 0,981 < 2,95^\circ$$

$$B = Z = 1,938 < 21,53^\circ \text{ ohm}$$

$$C = Y \cdot 1 + \frac{YZ}{4} = 0,0556 < 91,46^\circ$$

Mencari daya semu yang dikirimkan dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\
 &= \sqrt{47^2 + 3^2} \\
 &= \sqrt{2209 + 9} \\
 &= \sqrt{2218} = 47,095 \text{ VA}
 \end{aligned}$$

Besarnya faktor daya pada sisi pengirim dapat mempengaruhi daya yang diterima, untuk mencari besarnya faktor daya ( $\cos \theta$ ) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \cos \theta &= \frac{47}{47,095} \\
 &= 0,99
 \end{aligned}$$

Mencari besarnya arus yang dikirimkan ( $I_S$ ) proses perhitungan arus tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_S &= \frac{P_R}{\sqrt{3} \cdot \cos \theta \cdot V_S(L-L)} \\
 &= \frac{47.000}{\sqrt{3} \cdot 0,99 \cdot 150} \\
 &= \frac{256,905}{182,947}
 \end{aligned}$$

Mencari tegangan pada penerima ( $V_R$ ), proses perhitungan mencari besarnya nilai tegangan kirim sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_R &= DV_S - BI_S \\
 &= 0,981 < 2,95^\circ \times \frac{150}{\sqrt{3}} - 1,938 \\
 &\quad < 21,53^\circ \times 182,947 \\
 &= 85057,60 < 2,95^\circ - 354,53 < 21,53^\circ \\
 &= 8497,71 + j3843 - 329,799 + j130,11 \\
 &= 84640,91 + j3712 \\
 &= 84,722 < 2,51^\circ \text{ kV}_{(L-N)} \\
 &= 146,56 < 2,51^\circ \text{ kV}_{(L-L)}
 \end{aligned}$$

Mencari besarnya arus yang diterima ( $I_R$ ), perhitungan mencari besarnya nilai arus terima sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_R &= -CV_S + AI_S \\
 &= -0,0556 < 91,46^\circ \times \frac{150}{\sqrt{3}} + 97,05 < 0,981 \\
 &\quad < 2,95^\circ \times 182,947 \\
 &= (-482,79 < 91,46^\circ) + (179,46 < 2,95^\circ) \\
 &= (12,28 - j481,84) + (179,22 + j9,23)
 \end{aligned}$$

$$= 191,5 - j49,84$$

$$= 191,8 < -14,58^\circ A$$

Untuk mencari besarnya nilai faktor daya ( $\cos \theta$ ) dapat dicari besarnya nilai ( $\cos \theta$ ) sebagai berikut:

$$\cos R = \cos_{VR} - \cos_{IR}$$

$$= (2,51) - (-14,58)$$

$$= 17,09 = 0,95$$

Mencari besarnya daya yang diterima ( $P_R$ ) dari gardu induk pengirim adalah sebagai berikut:

$$P_R = V_{R(L-L)} \cdot I_R \cdot \cos \theta \cdot \sqrt{3}$$

$$= 146,56 \times 191,8 \times 0,95 \times \sqrt{3}$$

$$= 46,199 \text{ MW}$$

## 5.2 Hasil Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi

a. Hasil rugi daya jenis konduktor ACSR dapat dilihat pada Tabel 5.1

Tabel 5.1 Hasil Rugi-rugi Daya Konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup>

Tgl	P <sub>Losses</sub> Pukul 10.00			P <sub>Losses</sub> Pukul 19.00			P <sub>Losses</sub> (MW / Hari)
	P <sub>Losses</sub> R	P <sub>Losses</sub> S	P <sub>Losses</sub> T	P <sub>Losses</sub> R	P <sub>Losses</sub> S	P <sub>Losses</sub> T	
1	176368	189674	189674	425814	488817	488817	0,979
2	217738	232496	232496	425814	488817	488817	1,043
3	176368	189674	203464	386226	425814	467333	0,924
4	151207	176368	189674	367156	446332	446332	0,888
5	139352	163545	163545	96556	96556	96556	0,378
6	24193	24193	29274	96556	106453	116833	0,198
7	29274	34838	29274	78211	96556	96556	0,182
8	29274	34838	34838	87142	96556	96556	0,189
9	15484	15484	15484	78211	78211	78211	0,140
10	8710	11855	8710	87142	96556	96556	0,154
11	40886	40886	47419	96556	106453	106453	0,219
12	24193	24193	24193	78211	78211	87142	0,158
13	54435	61934	69918	96556	106453	106453	0,247
14	69918	78386	78386	61796	78211	78211	0,222
15	19596	24193	24193	78211	78211	78211	0,151
16	24193	29274	29274	96556	96556	96556	0,186
17	54435	61934	61934	78211	96556	96556	0,224
18	8710	11855	11855	69762	78211	87142	0,133
19	8710	8710	15484	69762	87142	87142	0,138
20	24193	29274	34838	96556	106453	106453	0,198
21	61934	61934	61934	78211	78211	96556	0,219
22	34838	40886	40886	87142	96556	96556	0,198
23	34838	40886	47419	87142	96556	106453	0,206
24	34838	34838	34838	47313	54313	54313	0,130
25	15484	19596	19596	47313	47313	54313	0,101
26	11855	8710	15484	69762	78211	69762	0,126
27	29274	29274	29274	69762	78211	78211	0,157
28	203464	232496	247737	405779	467333	488817	1,022
29	163545	163545	176368	386226	425814	446332	0,880
30	163545	176368	189674	386226	425814	446332	0,893
31	189674	189674	203464	425814	467333	386226	0,771
<b>TOTAL</b>							<b>11,670</b>

Dari Tabel 5.1 di atas rugi daya untuk konduktor ACSR tertinggi rugi-rugi daya terjadi pada tanggal 2 Juli 2018 yaitu sebesar 1,043088926 MW, dengan total rugi-rugi daya selama satu bulan sebesar 11,67057805 MW

b. Hasil rugi daya saluran transmisi 150 kV bulan Juli 2018 dengan jenis konduktor ACCC Lisbon dapat dilihat pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Hasil Rugi-rugi Daya Konduktor ACCC Lisbon

Tgl	P <sub>Losses</sub> Pukul 10.00			P <sub>Losses</sub> Pukul 19.00			P <sub>Losses</sub> (MW / Hari)
	P <sub>Losses</sub> R	P <sub>Losses</sub> S	P <sub>Losses</sub> T	P <sub>Losses</sub> R	P <sub>Losses</sub> S	P <sub>Losses</sub> T	
1	21925	26092	26092	58708	58708	72479	0,132
2	40769	46386	46968	58708	65412	65412	0,161
3	35514	46386	35514	58708	72479	72479	0,160
4	14677	18120	18120	52366	52366	58708	0,107
5	35514	35514	35514	30622	35514	35514	0,104
6	26092	30622	30622	35514	35514	35514	0,096
7	18120	18120	18120	26092	30622	30622	0,070
8	18120	18120	18120	30622	30622	30622	0,073
9	18120	26092	26092	26092	26092	26092	0,074
10	18120	21925	18120	30622	35514	35514	0,079
11	6523	4530	6523	21925	26092	26092	0,045
12	18120	18120	18120	35514	35514	35514	0,080
13	30622	35514	40769	30622	30622	30622	0,099
14	6523	6523	4530	21925	26092	26092	0,045
15	21925	21925	21925	46386	46386	52366	0,105
16	11597	11597	11597	26092	35514	26092	0,061
17	11597	11888	12184	25659	34507	26092	0,060
18	6523	4530	2899	21925	26092	26092	0,044
19	6523	6523	6523	46386	52366	52366	0,085
20	6523	6742	6523	46386	52366	52366	0,085
21	21925	26092	26092	35514	46386	46386	0,101
22	21925	26092	26092	52366	65412	65412	0,128
23	21925	26092	26092	52366	65412	62014	0,126
24	30622	30622	30622	58708	58708	65412	0,137
25	18120	18120	21925	40769	46386	46386	0,095
26	18120	21925	21925	35514	46386	46386	0,095
27	21925	26092	26092	35514	46386	46386	0,101
28	11597	11597	8879	142058	174130	163077	0,255
29	52366	72479	72479	209463	261648	261648	0,465
30	72479	72479	72479	163077	185545	185545	0,375
31	122489	163077	163077	185545	234831	234831	0,551
<b>TOTAL</b>							<b>4,209</b>

Dapat disimpulkan dari Tabel 5.2 di atas rugi daya untuk konduktor ACCC Lisbon tertinggi rugi-rugi daya terjadi pada tanggal 31 Juli 2018 yaitu sebesar 0,551924234 MW, dengan total rugi-rugi daya selama satu bulan sebesar 4,209515808 MW.

### 5.2.1 Hasil Rugi-rugi Daya dan Rupiah

- a. Hasil rugi-rugi daya dan kalkulasi dalam rupiah untuk jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> bulan Juli 2018 disajikan dalam Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Hasil Rugi-rugi Daya dan Kalkulasi dalam Rupiah Jenis Konduktor ACSR

Tgl	P <sub>Losses</sub>	Rugi Daya Listrik	Tgl	P <sub>Losses</sub>	Rugi Daya Listrik
	(MW / Hari)	(/kWh)		(MW / Hari)	(/kWh)
1	0,97	Rp 26.267.687	17	0,18	Rp 6.028.417
2	1,04	Rp 27.970.638	18	0,22	Rp 3.586.985,
3	0,92	Rp 24.789.030	19	0,13	Rp 3.713.222
4	0,88	Rp 23.826.233	20	0,13	Rp 5.333.118
5	0,37	Rp 10.137.655	21	0,19	Rp 5.883.000
6	0,19	Rp 5.329.563	22	0,21	Rp 5.321.019
7	0,18	Rp 4.889.873	23	0,19	Rp 5.541.295
8	0,18	Rp 5.084.228	24	0,20	Rp 3.492.048
9	0,14	Rp 3.768.648	25	0,13	Rp 2.729.985
10	0,15	Rp 4.150.038	26	0,10	Rp 3.402.615
11	0,21	Rp 5.881.306	27	0,12	Rp 4.210.046
12	0,15	Rp 4.238.719	28	0,15	Rp 27.426.93
13	0,24	Rp 6.646.823	29	1,02	Rp 23.621.92
14	0,22	Rp 5.965.136	30	0,88	Rp 23.972.243
15	0,15	Rp 4.057.338	31	0,89	Rp 20.689.978
16	0,18	Rp 4.993.122	<b>TOTAL (Rp)</b>		<b>Rp 312.948.884</b>

Dapat disimpulkan dari Tabel 5.3 rugi-rugi daya yang dikalkulasikan dalam rupiah dalam rentang waktu satu bulan untuk jenis konduktor ACSR sebesar Rp. 312.948.884.

- b. Hasil rugi-rugi daya dan kalkulasi rupiah untuk jenis konduktor ACCC Lisbon bulan Juli 2018 dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Hasil Rugi-rugi Daya dan Kalkulasi dalam Rupiah Jenis Konduktor ACCC

Tgl	P <sub>Losses</sub>	Rugi Energi Listrik	Tgl	P <sub>Losses</sub>	Rugi Energi Listrik
	(MW / Hari)	(/kWh)		(MW / Hari)	(/kWh)
1	0,132	Rp 3.539.648	17	0,060	Rp 1.634.749
2	0,161	Rp 4.339.434	18	0,044	Rp 1.180.692
3	0,160	Rp 4.304.912	19	0,085	Rp 2.288.503
4	0,107	Rp 2.873.990	20	0,085	Rp 2.291.442
5	0,104	Rp 2.791.390	21	0,101	Rp 2.713.649
6	0,096	Rp 2.599.467	22	0,128	Rp 3.449.760
7	0,070	Rp 1.899.797	23	0,126	Rp 3.404.209
8	0,073	Rp 1.960.532	24	0,137	Rp 3.682.983
9	0,074	Rp 1.992.115	25	0,095	Rp 2.570.314
10	0,079	Rp 2.142.738	26	0,095	Rp 2.550.879
11	0,045	Rp 1.229.280	27	0,101	Rp 2.713.649
12	0,080	Rp 2.157.315	28	0,255	Rp 6.855.791
13	0,099	Rp 2.665.061	29	0,465	Rp 12.470.155
14	0,045	Rp 1.229.280	30	0,375	Rp 10.077.187
15	0,105	Rp 2.827.831	31	0,551	Rp 14.799.958
16	0,061	Rp 1.642.280	<b>TOTAL (Rp)</b>		<b>Rp 112.879.008</b>

Dari Tabel 5.4 dapat disimpulkan hasil rugi-rugi daya yang hilang dalam rentang waktu satu bulan untuk konduktor ACCC Lisbon dikalkulasikan dalam rupiah sebesar Rp 112.879.008,28.

### 5.2.2 Efisiensi Transmisi

Hasil efisiensi saluran transmisi didapatkan dari perhitungan daya yang dikirimkan dengan memperhitungkan rugi daya dari efek korona pada saluran transmisi yang diterima oleh GI Pekalongan dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6.

- a. Hasil efisiensi saluran transmisi bulan Juli 2018 150 kV GI Batang – GI Pekalongan untuk jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> sebagai berikut:

Tabel 5.5 Efisiensi Saluran Transmisi

Tanggal	Efisiensi Pukul 10.00	Efisiensi Pukul 19.00
1	99,12 %	98,64 %
2	99,04 %	98,63 %
3	99,10 %	98,67 %
4	99,11 %	98,66 %
5	99,18 %	99,43 %
6	99,68 %	99,42 %
7	99,58 %	99,46 %
8	99,63 %	99,44 %
9	99,74 %	99,50 %
10	99,77 %	99,43 %
11	99,60 %	99,40 %
12	99,71 %	99,49 %
13	99,52 %	99,40 %
14	99,49 %	99,50 %
15	99,68 %	99,45 %
16	99,66 %	99,42 %
17	99,51 %	99,43 %
18	99,92 %	99,51 %
19	99,78 %	99,46 %
20	99,69 %	99,40 %
21	99,55 %	99,46 %
22	99,62 %	99,44 %
23	99,61 %	99,43 %
24	99,66 %	99,58 %
25	99,70 %	99,58 %
26	99,77 %	99,48 %
27	99,67 %	99,51 %
28	99,04 %	98,71 %
29	99,18 %	98,75 %
30	99,14 %	98,72 %
31	99,06 %	99,06 %
<b>Efisiensi Total</b>		<b>99,39%</b>

Disimpulkan dari Tabel 5.5 di atas efisiensi saluran transmisi untuk jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> selama satu bulan dapat diperoleh sebesar 99,39%.

- b. Hasil efisiensi saluran transmisi bulan Juli 2018 150 kV GI Batang – GI Pekalongan untuk jenis konduktor ACCC Lisbon.

Tabel 5.6 Efisiensi Saluran Transmisi

Tanggal	Efisiensi Pukul 10.00	Efisiensi Pukul 10.00
1	99,73 %	99,59 %
2	99,63 %	99,59 %
3	99,65 %	99,58 %
4	99,75 %	99,63 %
5	99,68 %	99,68 %
6	99,72 %	99,68 %
7	99,81 %	99,71 %
8	99,74 %	99,71 %
9	99,72 %	99,73 %
10	99,73 %	99,69 %
11	99,91 %	99,72 %
12	99,49 %	99,69 %
13	99,53 %	99,71 %
14	99,94 %	99,72 %
15	99,38 %	99,63 %
16	99,85 %	99,72 %
17	99,78 %	99,72 %
18	99,90 %	99,75 %
19	99,51 %	99,64 %
20	99,72 %	99,64 %
21	99,05 %	99,66 %
22	99,49 %	99,60 %
23	99,71 %	99,61 %
24	99,64 %	99,61 %
25	99,80 %	99,61 %
26	99,73 %	99,66 %
27	99,66 %	99,66 %
28	99,77 %	99,35 %
29	98,77 %	99,17 %
30	99,52 %	99,32 %
31	99,05 %	99,21 %
<b>Efisiensi Total</b>	<b>99,62%</b>	<b>99,62%</b>

Dari Tabel 5.6 dapat disimpulkan efisiensi saluran transmisi untuk jenis konduktor ACCC Lisbon selama satu bulan sebesar 99,62% mendekati 100%.

### 5.2.3 Hasil Perbandingan Pengukuran PLN dengan Perhitungan Menggunakan Metode Nominal $\pi$

Hasil perhitungan akan dibandingkan dan dibuktikan antara data dari PLN dengan data perbandingan menurut perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$  data hasil perbandingan disajikan dalam Tabel 5.7 dan perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$  Tabel 5.8.

Tabel 5.7 Perbandingan Hasil Perhitungan Menggunakan Metode Nominal  $\pi$  dengan Data PLN

Data Beban Pada Sisi Pengirim						
$V_S = 150 \text{ kV}$		$I_S = 182,947 \text{ A}$		$P_S = 47,192 \text{ MW}$		
Data Hasil Pengukuran PLN Sisi Terima Jenis Konduktor ACCS 240/40 mm <sup>2</sup>						
Tegangan ( $V_R$ )		Arus ( $I_R$ )		Daya ( $P_R$ )		
Tgl	10.00	19.00	10.00	19.00	10.00	19.00
1	134	136	270	420	63	102
2	137	135	300	420	71	101
3	134	133	270	400	63	95

4	130	131	250	390	58	93
5	134	145	240	200	57	51
Data Hasil Pengukuran PLN Sisi Terima Jenis Konduktor ACCC Lisbon						
Tgl	Tegangan ( $V_R$ )		Arus ( $I_R$ )		Daya ( $P_R$ )	
	10.00	19.00	10.00	19.00	10.00	19.00
1	145	142	110	180	28	47
2	145	147	150	180	37	47
3	145	147	140	180	34,2	48,3
4	141	147	90	170	21	45
5	143	145	140	130	34	32

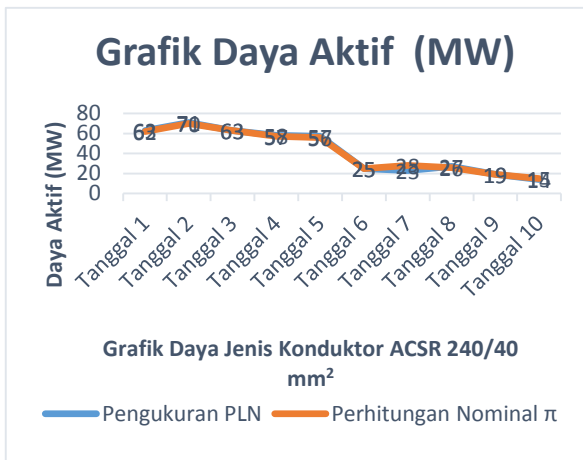
Tabel 5.8 Hasil Perhitungan Menggunakan Metode Nominal  $\pi$

Data Hasil Perhitungan Jenis Konduktor ACSR							Selisih $P_S$ dan $P_R$	Selisih $P_S$ dan $P_R$
Sisi Terima dengan Metode Nominal $\pi$								
Tg	Tegangan ( $V_R$ )		Arus ( $I_R$ )		Daya ( $P_R$ )		MW	MW
	1	10.0	19.0	10.0	19.0	10.0	19.0	10.0
	0	0	0	0	0	0	0	0
1	149,4	148,8	245,9	397,4	62,9	102,3	-0,05	0,33
2	149,3	148,8	277,7	393,8	70,9	101,4	-0,01	0,4
3	149,4	148,9	246,6	369,8	63,1	95,2	0,13	0,29
4	149,5	148,9	225,7	359,5	57,8	92,6	-0,18	-0,33
5	149,5	149,6	221,8	197,0	56,8	51,0	-0,16	0,01
Data Hasil Perhitungan jenis Konduktor ACCC Lisbon							Selisih $P_S$ dan $P_R$	Selisih $P_S$ dan $P_R$
Sisi Terima dengan Metode Nominal $\pi$								
Tg	Tegangan ( $V_S$ )		Arus ( $I_S$ )		Daya ( $P_S$ )		P (MW)	P (MW)
	1	10.0	19.0	10.0	19.0	10.0	19.0	10.0
	0	0	0	0	0	0	0	0
1	147,4	147,52	106,09	178,14	27,04	45,46	-0,96	-1,54
2	147,6	147,52	144,84	177,94	36,97	45,41	-0,03	-1,59
3	147,6	147,54	138,81	183,00	35,42	46,71	1,22	-1,59
4	147,4	147,50	81,61	170,59	20,78	43,53	-0,22	-1,47
5	147,5	147,35	130,48	123,96	33,29	31,59	-0,71	-0,41

Dari hasil pengukuran PLN maupun perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$  dapat disimpulkan nilai rata-rata tegangan, arus, daya serta persentase error dari pengiriman sampai ke penerima dapat dilihat pada Tabel 5.9.

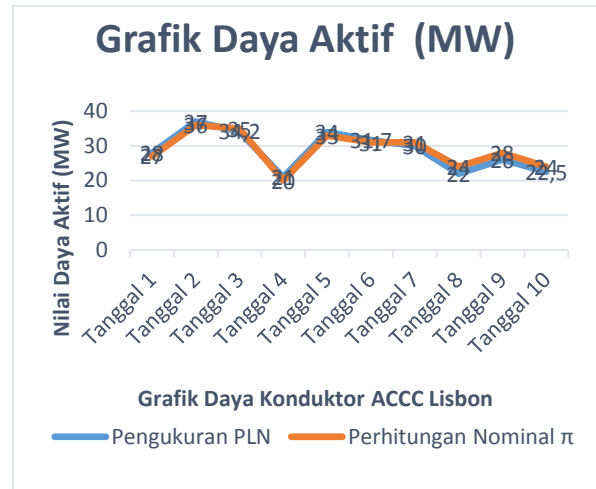
Tabel 5.9 Rata-rata Arus, Tegangan dan Daya Aktif

Nilai Rata-rata konduktor ACSR 240/40 mm <sup>2</sup>				Persentase Error (%)
Rata-rata pada sisi pengirim		Rata-rata sisi penerima versi Metode Nominal $\pi$		
Tegangan (kV)	150 kV	Tegangan (kV)	149,67 kV	-0,22%
Arus (Ampere)	195,527 A	Arus (Ampere)	196,50 A	0,50%
Daya Aktif (MW)	49,67 MW	Daya Aktif (MW)	50,86 MW	2,39%
Nilai Rata-rata konduktor ACCC Lisbon				Persentase Error (%)
Rata-rata pada sisi pengirim		Rata-rata sisi penerima versi Metode Nominal $\pi$		
Tegangan (kV)	150 kV	Tegangan (kV)	149,81 kV	-0,12%
Arus (Ampere)	129,86 A	Arus (Ampere)	127,35 A	-1,93%
Daya Aktif (MW)	33,36 MW	Daya Aktif (MW)	31,72 MW	-3,71%



Gambar 5.1 Grafik Daya Aktif Jenis Konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> dengan Perhitungan Menggunakan Metode Nominal  $\pi$

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.1 menunjukkan bahwa pada tanggal 1 sampai 10 dapat disimpulkan bahwa daya pengukuran hasil data PLN dengan data yang menggunakan perhitungan metode nominal  $\pi$  selisihnya tidak terlalu jauh, rata-rata nilai hasil pengukuran PLN sebesar 42 MW dan untuk hasil yang menggunakan metode nominal  $\pi$  sebesar 42,1 MW selisih dayanya sebesar 0,1 MW.



Gambar 5.2 Grafik Daya Aktif Jenis Konduktor ACCC Lisbon dengan Perhitungan Menggunakan Metode Nominal  $\pi$

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.2 menunjukkan bahwa jenis konduktor ACCC Lisbon didapatkan hasil selisih daya aktif antara data pengukuran dengan data yang menggunakan perhitungan metode nominal  $\pi$ , untuk data pengukuran daya aktif diperoleh sebesar 28,64 MW dan untuk perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$  sebesar 28,9 MW. Selisih antara data pengukuran dengan perhitungan menggunakan nominal  $\pi$  sebesar 0,26 MW, jarak selisihnya kurang dari 1 MW.

#### 5.2.4 Perbandingan Susut Tegangan dan Daya Perkilometer dari Jenis Konduktor ACSR, ACCC Lisbon dan ACCC 1000

Untuk mencari besarnya nilai rugi-rugi tegangan dan daya dapat menggunakan parameter yang terdapat pada Tabel 5.10 dan Tabel 5.11 dengan besarnya  $\cos \theta$  adalah 0,9.

Tabel 5.10 Parameter Untuk Menghitung Nilai Rugi-rugi Tegangan, dan Daya

No	Jenis Konduktor	Resistansi (R) $\Omega/km$	Arus Kirim ( $I_R$ )	Daya Terima ( $P_R$ )	Susut Tegangan (V) /1 km	Susut Arus (I) /1 km	Susut Daya (P) /1 km
1	ACSR (Hawk)	0,1188	190	28	31,81 V	0,56A	12,86 MW
2	ACCC Lisbon	0,0888			8,70 V	0,02 A	9,61 MW
3	ACCC 1000	0,0288			2,16 V	0,008 A	3,11 MW

Tabel 5.11 Parameter Nilai Bahan pada Setiap Jenis Konduktor

No	Jenis Konduktor	$X_C$ ( $M\Omega/km$ )	$X_L$ ( $\Omega/km$ )
1	ACSR (Hawk)	0,522	0,248
2	ACCC Lisbon	0,191	0,222
3	ACCC 1000	0,13221	0,2277

- Mencari besarnya susut tegangan dan daya untuk jenis konduktor ACSR

- Untuk menentukan besarnya susut tegangan untuk jarak 1 kilometer sebagai berikut.

$$V_d = \frac{(R \times 3 \times I \times X_C \times \cos \theta \times l)}{1000}$$

$$= \frac{(0,1188 \times 3 \times 190 \times 0,522 \times 0,9 \times 1000)}{1000}$$

$$= \frac{(31.812,97)}{1000}$$

$$= 31,81 \text{ V} = 0,031 \text{ kV}$$

- Untuk menentukan besarnya nilai susut daya untuk jarak 1 kilometer dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$P = 3 \cdot I^2 \cdot R$$

$$= 3 \times 190^2 \times 0,1188$$

$$= 12.866,04 \text{ Watt}$$

- Untuk mengetahui selisih besarnya susut tegangan dan daya pada setiap jarak saluran transmisi dapat dilihat pada Grafik dibawah ini.

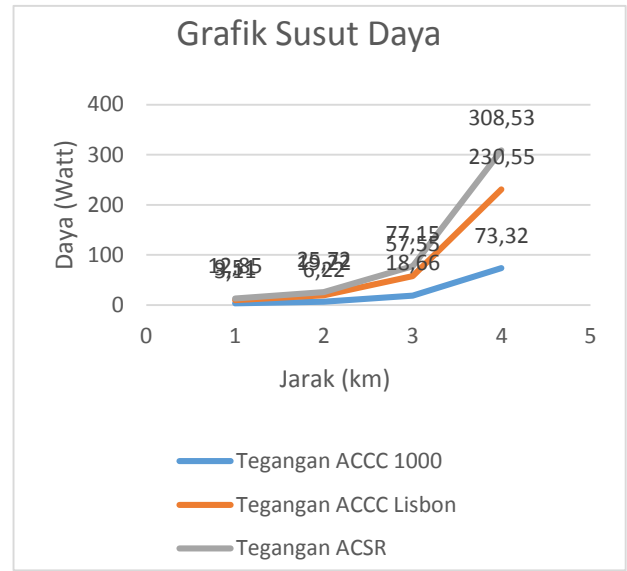
- Susut tegangan untuk jenis konduktor ACSR, ACCC Lisbon dan ACCC 1000 dapat dilihat pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Grafik Perbandingan Susut Tegangan

Dari grafik Gambar 5.3 didapatkan untuk susut tegangan perkilometer untuk konduktor ACSR sebesar 31,81 V, untuk jenis ACCC Lisbon sebesar 8,70 V dan untuk ACCC 1000 sebesar 2,16 V. Dapat disimpulkan bahwa konduktor jenis ACCC 1000 adalah yang paling kecil mengalami susut tegangannya.

- Susut daya untuk jenis konduktor ACSR, ACCC Lisbon dan ACCC 1000 dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Grafik Perbandingan Susut Daya

Dari grafik Gambar 5.4 didapatkan untuk susut daya perkilometer untuk konduktor ACSR sebesar 12,86 MW, untuk jenis ACCC Lisbon sebesar 9,61 MW dan untuk ACCC 1000 sebesar 3,11 MW. Dapat disimpulkan bahwa konduktor jenis ACCC 1000 adalah yang paling kecil mengalami susut dayanya.

## 6. PENUTUP

### 6.1. Kesimpulan

Dari hasil pengolahan data dan analisis data di atas diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Rugi-rugi daya saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV GI Batang – GI Pekalongan untuk bulan Juli 2018 jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> yaitu sebesar 11,67057805 MW dan untuk jenis konduktor ACCC Lisbon yaitu sebesar 4,209515808 MW.
- Besarnya efisiensi total saluran transmisi untuk penghantar jenis ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> sebesar 99,39 %. Sedangkan efisiensi transmisi total jenis penghantar ACCC Lisbon sebesar 99,62%.
- Rugi rupiah total selama satu bulan yang ditanggung PLN akibat daya yang hilang pada saat transmisi sebesar Rp 312.948.884,48 untuk jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> sedangkan rugi-rugi pada jenis konduktor ACCC Lisbon sebesar Rp 112.879.008,28.
- Hasil pengukuran telah diperoleh untuk nilai rata-rata tegangan, arus dan daya dalam satu bulan jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup> pada sisi kirim sebesar  $V_S = 150 \text{ kV}$ ,  $I_S = 195,527 \text{ A}$  dan  $P_S = 49,67 \text{ MW}$  dan hasil perhitungan menggunakan



metode nominal  $\pi$  sisi terima sebesar  $V_R = 149,67 \text{ kV}$ ,  $I_R = 196,50 \text{ A}$  dan  $P_R = 50,86 \text{ MW}$  selisih *error* untuk nilai tegangan  $-0,22\%$  arus  $0,50\%$  dan daya aktif  $2,39\%$ . Sedangkan jenis konduktor ACCC Lisbon diperoleh nilai pengukuran rata-rata sebesar pada sisi kirim  $V_S = 150 \text{ kV}$ ,  $I_S = 129,8 \text{ A}$  dan  $P_S = 33,36 \text{ MW}$  dan untuk hasil perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$  sisi terima sebesar  $V_R = 149,81 \text{ kV}$ ,  $I_R = 127,35 \text{ A}$  dan  $P_R = 31,72 \text{ MW}$  dengan selisih *error* untuk tegangan  $-0,12\%$ , arus  $-1,93\%$  dan daya aktif  $-3,73\%$ .

5. Rugi-rugi daya untuk jenis konduktor ACCC Lisbon lebih kecil dibandingkan dengan jenis konduktor ACSR 240/40 mm<sup>2</sup>.
6. Selisih *error* daya listrik antara hasil pengukuran PLN dengan hasil perhitungan menggunakan metode nominal  $\pi$  memiliki rentang antara  $0,12\%$  s/d  $4,94\%$ .
7. Susut tegangan perkilometer untuk konduktor ACSR sebesar  $31,81 \text{ V}$ , untuk jenis ACCC Lisbon sebesar  $8,70 \text{ V}$  dan untuk ACCC 1000 sebesar  $2,16 \text{ V}$  dan susut daya perkilometer untuk konduktor ACSR sebesar  $12,86 \text{ MW}$ , untuk jenis ACCC Lisbon sebesar  $9,61 \text{ MW}$  dan untuk ACCC 1000 sebesar  $3,11 \text{ MW}$ .

## 6.2. Saran

1. Saran yang dapat diberikan untuk peneliti selanjutnya terkait penelitian rugi-rugi daya saluran transmisi  $150 \text{ kV}$  adalah saat pengambilan data diharapkan agar dilakukan secara tepat waktu dan dalam waktu yang lama supaya dapat terlihat besarnya rugi-rugi yang terjadi.
2. Penelitian selanjutnya diharapkan menggunakan metode lain yang memiliki tingkat *error* antara pengukuran di lapangan dengan hasil perhitungan lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan metode nominal  $\pi$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- A. Arismunandar. DR, S. Kuwahara. DR. (2004). *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid III*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Aslimeri, Ganefri, Zaedel Hamdi. (2008). *Teknik Transmisi Tenaga Listrik Jilid 2*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Hutauruk, T.S. Prof. Ir. M.Sc.(1966). *Transmisi Daya Listrik*. Jakarta : Erlangga.
- Muslim Supari. (2008). *Teknik Pembangkit Tenaga Listrik Jilid 3*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Olgierd Malyszko, Michal Zenczak.(2018). *Some Ecological Problem with Overhead Power Transmission Lines with High Current-Carrying Capacity*. Polandia: IEEE.
- PT. PLN (Persero). (1984). *Buku Petunjuk Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik*. Jakarta: PT. PLN (Persero).
- PT. PLN (Persero). (2014). *Buku Pedoman Pemeliharaan Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET)*. Jakarta: PT. PLN (Persero).
- PT. PLN (Persero). (2015). *Buku Pedoman Pengenalan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi Udiklat Semarang*. Semarang: PT. PLN (Persero).
- PPPPTK BMTI. (2008). *Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Saadat Hadi. (2002). *Power Sistem Analysis*. USA. McGraw-Hill Companies, Inc.
- Suripto, Slamet. (2016). *Buku Ajar Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- W. J. R. H. Pooler. (2018). *Electrical Power*. Inggris: Universitas Cambridge. IEEE.