



RUGI-RUGI ENERGI PADA SALURAN TRANSMISI

Tugas Akhir

**Oleh:
Oloan Gana Putra Siregar (4232331001)**

**Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2025**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul: "Rugi-Rugi Energi Pada Jaringan Transmisi" adalah **hasil karya sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.** Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 31 Desember 2024



Oloan Gana Putra Siregar

Nama Lengkap Penulis 1

NIM: 4232331001

Lembar Pengesahaan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)
di
Politeknik Negeri Batam

Oleh:
Oloan Gana Putra Siregar (4232331001)

Tanggal Sidang: 08, 01, 2025

Disetujui oleh:



1. Ir. Arif Febriansyah Juwito, S.T.,
M.Eng
NIK: 114127

1. Irwanto Zarma Putra, S.Pd.,
M.Eng
NIK: 118200



2. Ir. Muhammad Syafei Gozali, S.T, M.T.
NIK: 107050

[RUGI-RUGI PADA SALURAN TRANSMISI]

Abstrak

Jaringan energi listrik dari pembangkit menuju ke konsumen tersusun melalui beberapa tahapan saluran, yaitu saluran transmisi tegangan tinggi, ekstra tinggi, tegangan menengah, hingga tegangan rendah pada sisi distribusi. Setiap saluran memiliki karakteristik yang berbeda, terutama terkait jarak dan kapasitas penghantaran daya. Dalam sistem ini, jarak antara pembangkit dan konsumen biasanya cukup jauh sehingga muncul berbagai permasalahan teknis. Ketika saluran transmisi dialiri arus listrik, timbul impedansi yang menyebabkan terjadinya jatuh tegangan serta rugi-rugi daya. Besarnya rugi-rugi tersebut dipengaruhi oleh faktor jarak penghantaran, jenis material konduktor, serta luas penampang kabel yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara lebih mendalam pengaruh impedansi saluran transmisi terhadap jatuh tegangan dan rugi-rugi daya listrik dengan menggunakan perangkat *smart grid trainer* sebagai media simulasi. Pengujian dilakukan dengan cara mengubah nilai impedansi pada saluran transmisi untuk melihat perbedaan hasil tegangan dan daya yang hilang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar impedansi saluran, semakin signifikan pula penurunan tegangan dan peningkatan rugi-rugi daya yang terjadi pada jaringan. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian impedansi dalam jaringan transmisi merupakan faktor penting dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik. Dengan analisis ini dapat disimpulkan bahwa karakteristik impedansi sangat memengaruhi efisiensi penyaluran energi listrik dari pembangkit menuju konsumen, sehingga perlu dipertimbangkan dalam desain maupun pengoperasian sistem tenaga.

Kata Kunci: Impedansi Saluran, Jatuh tegangan, Rugi-rugi daya.

[ENERGY LOSSES IN TRANSMISSION LINES]

Abstract

The electrical energy network from the power plant to the consumers is arranged through several stages of transmission lines, namely high-voltage, extra high-voltage, medium-voltage, and low-voltage distribution lines. Each line has different characteristics, particularly in terms of distance and power delivery capacity. In this system, the distance between the power plant and the consumers is generally quite far, which introduces several technical challenges. When transmission lines are supplied with electric current, impedance arises, leading to voltage drop and power losses. The magnitude of these losses is influenced by the transmission distance, the type of conductor material, and the cross-sectional area of the cable used. This research aims to analyze in more detail the effect of transmission line impedance on voltage drop and power losses by using a smart grid trainer as the simulation medium. The experiment was conducted by varying the impedance values on the transmission line to observe the differences in voltage and power losses. The results show that the greater the impedance of the line, the more significant the voltage drop and power losses that occur within the network. This confirms that impedance control in transmission networks plays a crucial role in maintaining the reliability of the power system. Based on the analysis, it can be concluded that impedance characteristics strongly affect the efficiency of electrical energy delivery from the power plant to consumers and must be carefully considered in both design and operation of power systems.

Keywords: Line Impedance, Voltage Drop, Power Losses.

Kata Pengantar

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya kepada penyusun sehingga penyusun dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “Analisis Rugi-Rugi Energi Listrik Pada Jaringan Transmisi yang Dipengaruhi oleh Impedansi Menggunakan Smart Grid Traine (AEL-BSGC)”. Laporan tugas akhir ini dibuat untuk memenuhi salah satu syarat ujian guna memperoleh gelar sarjana terapan (D4) program studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi di Politeknik Negeri Batam.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Irwanto Zarma Putra, S.Pd., M.Eng, sebagai ketua prodi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi dan dosen pembimbing pertama atas arahan dan bimbingan kepada penyusun selama proses pembuatan tugas akhir hingga penulisan laporan tugas akhir ini.
2. Bapak Ir.Arif Febriansyah Juwito, S.T. dan Bapak Ir.Muhammad Syafei Gozali,ST, M.T. selaku penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penyusun selama pelaksanaan tugas akhir ini.
3. Bapak dan Ibu seluruh staf akademik, dosen, dan laboran yang telah banyak membantu dalam proses penyusunan laporan tugas akhir ini.
4. Kedua orangtua, Istri dan anak tercinta yang tiada lelah memberikan do’a, kasih sayang, dorongan, motivasi, serta dukungan baik moril maupun materil kepada penulis.

Semoga Allah SWT memberikan balasan terhadap semua pihak yang telah memberikan bantuannya terhadap penulis. Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat diterima serta dapat memberikan manfaat bagi para pembaca. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, guna perbaikan kedepannya penulis memohon kritik dan saran dari pembaca yang dapat disampaikan secara lisan maupun secara tulisan.

Akhir kata, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya apabila di dalam laporan tugas akhir ini terdapat kesalahan dalam penulisan kata, nama dan gelar.

Batam, 15 Januari 2025



Oloan Gana Putra Siregar

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	i
Lembar Pengesahaan	ii
Abstrak	iii
<i>Abstract</i>	iv
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar	viii
Daftar Tabel	ix
Bab 1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	1
1.3. Tujuan	2
1.4. Manfaat	2
1.5. Batasan	2
Bab 2. Tinjauan Pustaka	3
2.1. Impedansi Saluran Transmisi	3
2.2. Pemodelan Saluran Transmisi	6
2.3. Rugi-Rugi Energi Listrik	8
Bab 3. Metode Penelitian	11
3.1. Perancangan	11
3.2. Alat dan Bahan	12
3.3. Objek Penelitian	12
3.4. Pengujian	12
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	14
4.1. Data Hasil Pengujian	14
4.1.1. Data Hasil Rugi-Rugi Energi Listrik	14
4.2. Pembahasan	19

4.2.1. Pengaruh impedansi saluran R terhadap jatuh tegangan.....	19
4.2.2. Pengaruh impedansi saluran R-L terhadap jatuh tegangan.....	20
4.2.3. Pengaruh impedansi saluran R-C terhadap jatuh tegangan	21
4.2.4. Pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan	22
4.2.5. Pengaruh impedansi saluran R terhadap rugi daya aktif.....	24
4.2.6. Pengaruh impedansi saluran R-C terhadap rugi daya aktif.....	26
4.2.7. Pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi daya aktif.....	27
4.2.8. Pengaruh impedansi saluran R-L- terhadap rugi daya reaktif.....	29
4.2.9. Pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi daya reaktif	31
4.2.10. Pengaruh impedansi saluran R terhadap rugi daya semu	33
4.2.11. Pengaruh impedansi saluran R-L terhadap rugi daya semu.....	34
4.2.12. Pengaruh impedansi saluran R-C terhadap rugi daya semu	35
4.2.13. Pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi daya semu	36
Bab 5. Kesimpulan dan Saran	39
5.1. Kesimpulan	39
5.2. Saran.....	39
Daftar Pustaka	40
LAMPIRAN	41
Biodata	42

Daftar Gambar

Gambar 1. Model Saluran Pendek.....	6
Gambar 2. Model Saluran Menengah π	7
Gambar 3. Diagram alir tahapan penelitian	11
Gambar 4. Wiring diagram rangkain Pengujian.....	13
Gambar 5. Grafik pengaruh impedansi saluran R terhadap jatuh tegangan	19
Gambar 6. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L terhadap jatuh tegangan	20
Gambar 7. Grafik pengaruh impedansi saluran R-C terhadap jatuh tegangan.....	21
Gambar 8. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan..	22
Gambar 9. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan..	22
Gambar 10. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan	23
Gambar 11. Grafik pengaruh impedansi saluran R terhadap daya aktif.....	24
Gambar 12. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L terhadap daya aktif.....	25
Gambar 13. Grafik pengaruh impedansi saluran R-C terhadap daya aktif	26
Gambar 14. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya aktif	27
Gambar 15. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya aktif	27
Gambar 16. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya aktif	28
Gambar 17. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L terhadap daya reaktif	29
Gambar 18. Grafik pengaruh impedansi saluran R-C terhadap daya reaktif.....	30
Gambar 19. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya reaktif	31
Gambar 20. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya reaktif	31
Gambar 21. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya reaktif	32
Gambar 22. Grafik pengaruh impedansi saluran R terhadap daya semu	33
Gambar 23. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L terhadap daya semu	34
Gambar 24. Grafik pengaruh impedansi saluran R-C terhadap daya semu.....	35
Gambar 25. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya semu.....	36
Gambar 26. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya semu.....	36
Gambar 27. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya semu.....	37

Daftar Tabel

Tabel 1. Data Pengujian Impedansi Resistif (R)	14
Tabel 2. Data Pengujian Impedansi Resistif-Induktif (R-L).....	15
Tabel 3. Data Pengujian Impedansi Resistif-Capacitif (R-C).....	15
Tabel 4. Data Pengujian Impedansi Resistif-Induktif-Capacitif (R-L-C)	16

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Jaringan energi listrik dari pembangkit menuju konsumen melalui beberapa tahapan atau beberapa saluran. Saluran transmisi untuk tegangan tinggi, extra tinggi, tegangan menengah, serta tegangan rendah untuk saluran distribusi. Di dalam saluran, dari pembangkit menuju konsumen memiliki jarak yang cukup jauh. Pada saat saluran transmisi dialiri arus listrik akan muncul impedansi yang mengakibatkan drop tegangan pada sisi saluran. Besarnya drop tegangan tersebut dipengaruhi oleh gerak, jenis bahan, luas penampang. Untuk mengatasi hal ini maka perlu dilakukan pengujian atau analisis terkait dengan pengaruh dari impedansi terhadap besarnya drop tegangan saluran.

Analisis pengaruh impedansi telah dilakukan beberapa oleh peneliti, pertama oleh peneliti [Muhammad Radil, Riad Syech, Sugianto] (2014) Analisis rugi-rugi daya pada penghantar saluran transmisi tegangan tinggi 150 kV dari gardu induk kota panjang ke gardu induk garuda sakti pekanbaru dan menemukan bahwa meningkatnya rugi-rugi daya disebabkan oleh besarnya daya hantar yang ditransmisikan. Kedua oleh peneliti [Moh. Amir dan Irwan Ardhi Winarno] (2020) menganalisis susut tegangan saluran transmisi tegangan ekstra tinggi 500 kV dan menemukan bahwa pengaruh dari susut tegangan adalah besarnya arus dan impedansi pada kawat penghantar. Ketiga oleh peneliti [Sulistianingsih Nur Fitri, Fatmawati Azis] (2024) menganalisis pengaruh parameter sistem transmisi tenaga listrik pada saluran transmisi pendek dan menemukan bahwa Hasil pada percobaan pertama menunjukkan semakin besar nilai beban induktif maka nilai tegangan penerima dan nilai daya sisi penerima juga semakin besar dan pada percobaan kedua menunjukkan bahwa semakin besar nilai beban C maka nilai tegangan sumber dan tegangan penerima juga semakin besar. Sedangkan nilai arus sumber, arus penerima dan daya penerima semakin kecil.

Maka dalam penelitian ini penulis akan melakukan penelitian dengan judul Analisis Rugi-Rugi Pada Saluran Transmisi. Penelitian ini dilakukan untuk dapat dijadikan pedoman dan evaluasi untuk mempekecil daya yang hilang dan memaksimalkan daya yang dikirim dari pembangkit menuju konsumen.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dipilih untuk dibahas dalam tugas akhir ini antara lain sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh impedansi saluran terhadap jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi?

2. Bagaimana hubungan antara impedansi saluran dengan jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi?

1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini antara lain:

1. Menganalisis pengaruh impedansi saluran terhadap jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi.
2. Menganalisis hubungan antara impedansi saluran dengan jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi.

1.4. Manfaat

Manfaat dari dilaksanakan tugas akhir ini antara lain:

1. Memberikan informasi terkait korelasi antara impedansi saluran terhadap rugi-rugi energi listrik.
2. Menganalisis pengaruh impedansi saluran terhadap rugi-rugi energi listrik.
3. Dapat menjadi acuan dalam menentukan saluran transmisi yang ideal.

1.5. Batasan

1. Rugi-rugi energi listrik dibatasi pada saluran transmisi jarak menengah dikarenakan rangkaian pengujian simulator menggunakan rangkaian nominal π .
2. Rugi-rugi energi listrik dibatasi pada kapasitansi saluran antara fasa dan netral.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. Impedansi Saluran Transmisi

Secara umum, sistem ketenagalistrikan terdiri dari lima bagian utama: pembangkit listrik, sistem transmisi, gardu induk, sistem distribusi, dan beban. Sumber energi listrik berasal dari pembangkit tenaga listrik yang lokasinya biasanya jauh dari area beban. Untuk mengirimkan energi listrik yang dihasilkan, diperlukan sistem transmisi[1]. Saluran Transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pembangkit listrik sampai gardu distribusi hingga sampai konsumen pengguna listrik. Pada saluran transmisi terdapat impedansi saluran yang timbul akibat adanya resistansi, induktansi, dan kapasitansi.

Resistansi

Setiap konduktor mempunyai hambatan terhadap aliran arus listrik, yang dikenal dengan istilah resistansi. Resistansi atau hambatan dalam suatu konduktor (kawat penghantar) merupakan faktor utama penyebab rugi daya pada saluran transmisi. Besarnya nilai resistansi dipengaruhi oleh resistivitas atau hambatan jenis pada setiap konduktor, panjang konduktor, dan luas penampang konduktor. Seperti persama berikut[2]:

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- R = Resistansi (ohm)
- ρ = Resistivitas atau hambatan jenis (ohm.meter)
- l = Panjang kawat (m)
- A = Luas Penampang (m^2)

Induktansi

Induktansi pada saluran transmisi merupakan akibat dari adanya medan magnet yang muncul di sekitar penghantar yang dialiri arus[3]. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan induktansi pada konduktor transmisi yaitu:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{(D)}{(GMR)} H \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

- L = Induktansi (H)
- D = jarak antar konduktor (m)
- GMR = Geometrik Mean Radius (m)

Kapasitansi

Kapasitansi merupakan kemampuan dua konduktor yang dipisahkan oleh bahan isolator untuk menyimpan muatan listrik ketika diberikan tegangan di antara keduanya. Jika arus listrik mengalir melalui dua konduktor yang terpisah pada jarak tertentu, akan terbentuk fluks elektrostatik, menjadikan kedua konduktor tersebut berfungsi sebagai kapasitor. Besarnya kapasitansi bergantung pada jari-jari konduktor dan jarak antar konduktor, tetapi tidak dipengaruhi oleh medan magnet. Persamaan kapasitansi saluran dinyatakan sebagai berikut:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

- C = Kapasitansi (F)
- ϵ_0 = Permittivitas $8,85 \times 10^{-12}$ (F/m)
- GMD = Geometric Mean Distance = $r^{n-1} \sqrt{n}$

Reaktansi Saluran

Reaktansi saluran merupakan nilai hambatan yang timbul akibat adanya nilai induktansi dan kapasitansi penghantar[4] dalam sebuah saluran. Setelah mendapatkan nilai induktansi dengan persamaan (3), Selanjutnya tentukan persamaan untuk menentukan nilai reaktansi Induktif pada penghantar[2][5]:

$$X_L = 2\pi fL \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

- X_L = Reaktansi Induktif (Ohm)
- f = Fekkuensi (Hz)
- L = Induktansi (H)

Setelah mendapatkan nilai kapasitansi dengan persamaan (5), Selanjutnya tentukan persamaan untuk menentukan nilai reaktansi kapasitif pada penghantar[2][5]:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fc} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

- X_C = Reaktansi kapasitif (ohm)
- C = Kapasitansi (F)

Reaktansi (X) adalah komponen dari impedansi listrik yang berhubungan dengan elemen induktif dan kapasitif dalam suatu rangkaian arus bolak-balik (AC).Persamaan Reaktansi yaitu:

$$X = X_L - X_C \dots\dots\dots (6)$$

Dimana:

- X = Reaktansi (Ohm)

X_L = Reaktansi Induktif (Ohm)

X_C = Reaktansi kapasitif (ohm)

Tidak seperti resistansi yang menyebabkan hilangnya daya dalam bentuk panas, reaktansi hanya menyebabkan pergeseran fasa antara arus dan tegangan tanpa mengonsumsi daya aktif. Reaktansi dibagi menjadi dua jenis, yaitu reaktansi induktif (X_L) dan reaktansi kapasitif (X_C). Dalam bentuk matematis, reaktansi merupakan bagian imajiner dari impedansi total ($Z=R\pm jX$), di mana tanda positif digunakan untuk induktif dan negatif untuk kapasitif. Meskipun tidak menimbulkan rugi daya aktif, reaktansi tetap berpengaruh terhadap performa sistem karena dapat menyebabkan daya reaktif dan menurunkan faktor daya suatu sistem kelistrikan.

Impedansi

Impedansi (Z) terdiri dari dua komponen utama, yaitu Resistansi (R) dan Reaktansi (X). Impedansi adalah parameter yang sangat penting dalam sistem saluran transmisi atau distribusi. Kombinasi resistansi dan reaktansi ini dikenal sebagai impedansi, yang diukur dalam satuan Ohm (Ω). Untuk melakukan analisis sistem, seperti analisis aliran daya, pengujian hubung singkat dan proteksi, kestabilan sistem, serta pengendalian sistem, nilai impedansi pada saluran transmisi atau distribusi harus diketahui. Nilai resistansi dan reaktansi (baik induktif maupun kapasitif) dipengaruhi oleh jarak antara saluran dan jumlah serat kawat penghantarnya. Berikut merupakan persamaan untuk menentukan nilai impedansi[2]:

$$Z = R + jX \dots\dots\dots (7)$$

Atau

$$Z = \sqrt{R^2 + j(X_L - X_C)^2} \dots\dots\dots (8)$$

Dimana:

- Z = Impedansi (Ohm)
- R = Resistansi (Ohm)
- jX = Reaktansi (Ohm)
- X_L = Reaktansi Induktif (Ohm)
- X_C = Reaktansi Kapasitif (Ohm)

Admitansi konduktor

Kapasitansi terdapat diantara penghantar pada saluran fasa tunggal atau dari sebuah penghantar ke netral pada saluran fasa tiga membentuk admitansi *shunt admittance*. Nilai admitansi pada saluran transmisi dapat ditentukan.

$$Y = \frac{1}{jX_C} l \dots\dots\dots (9)$$

Dimana:

Y = admitansi seri saluran transmisi (Ω/km)

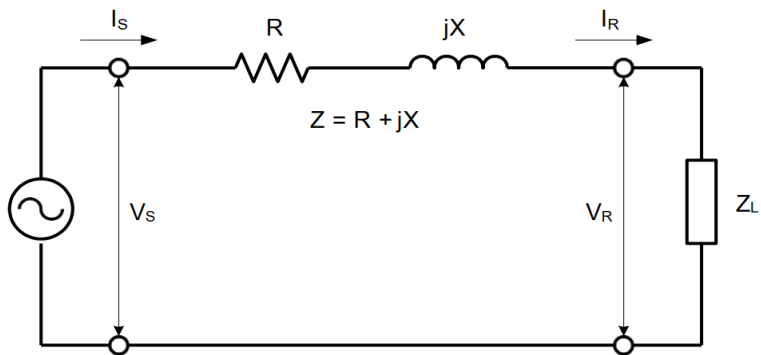
X_c = reaktansi kapasitif saluran transmisi (Ω/km)

l = Panjang saluran transmisi (Ω/km)

2.2. Pemodelan Saluran Transmisi

Saluran Transmisi Pendek (jarak ≤ 80 km)

Pada saluran transmisi pendek, kapasitansi penghantar dianggap dapat diabaikan, sehingga model yang digunakan hanya mempertimbangkan impedansi berupa resistansi (R) dan induktansi (L) [6]. Oleh karena itu, saluran transmisi dapat direpresentasikan seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 1. Model Saluran Pendek

Rangkaian dapat diselesaikan dengan cara yang sama seperti rangkaian AC seri sederhana. Karena tidak ada cabang paralel (shunt), arus pada ujung pengirim dan penerima memiliki nilai yang sama. Arus pada ujung pengirim dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I_S = I_R = I \dots\dots\dots (10)$$

Menghitung besar tegangan pada pengirim yaitu:

$$V_S = \frac{V_{S \text{ Line}}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (11)$$

Untuk mencari tegangan ujung penerima menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_R = V_S - I_R \cdot Z \dots\dots\dots (12)$$

Dimana:

V_S = Tegangan saluran terhadap netral pada ujung pengirim (V)

V_R = Tegangan saluran terhadap netral pada ujung penerima (V)

I_S = Arus pada ujung pengirim (A)

- I_R = Arus pada ujung penerima (A)
- Z = Impedansi saluran (ohm)

Saluran Transmisi Menengah (jarak 80 km – 250 km)

Pada saluran transmisi menengah, semakin panjang saluran transmisi, arus pengisian yang diakibatkan oleh adanya kapasitansi dalam saluran harus diperhitungkan. Pada saluran ini, kapasitansi dapat dipusatkan pada suatu titik (nominal T) atau pada dua buah titik (nomial π) [6]. Untuk model saluran T, kapasitansi dihubungkan paralel ditengah-tengah saluran (Y) seperti diperlihatkan dalam gambar 2. Sedangkan untuk model saluran π , kapasitansi dihubungkan paralel pada sisi pengirim dan sisi penerima yang mengasumsikan setengah dari kapasitansi shunt ($Y/2$) terkonsentrasi disetiap ujung saluran[11].

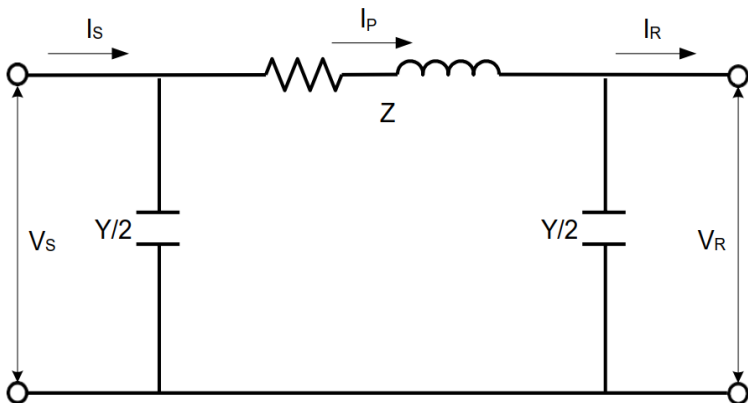
Dalam saluran, kapasitansi mempengaruhi admitansi shunt dari saluran transmisi. Admitansi shunt pada saluran transmisi dinyatakan sebagai:

$$Y = j\omega Cl \dots\dots\dots (13)$$

dimana:

- Y = Admitansi shunt (Siemens)
- ω = Frekuensi sudut sistem ($2\pi f$)
- l = Panjang total saluran transmisi (m)

Untuk model saluran π dua buah kapasitansi dihubungkan paralel pada sisi pengirim dan penerima saluran seperti diperlihatkan dalam gambar 3 dibawah ini.



Gambar 2. Model Saluran Menengah π

Relasi tegangan dan arus diberikan oleh:

$$V_S = V_R + I_P \cdot Z$$

Tetapi,

$$I_P = I_R + V_R \cdot Y/2$$

Jadi,

$$V_S = V_R + \left(I_R + V_R \cdot \frac{Y}{2} \right) Z$$

$$V_S = \left(1 + Z \cdot \frac{Y}{2} \right) V_R \cdot Z \cdot I_R \dots\dots\dots(14)$$

Arus,

$$I_S = I_P + V_S \cdot \frac{Y}{2}$$

$$I_S = I_R + V_R \cdot \frac{Y}{2} + \left(1 + Z \cdot \frac{Y}{2} \right) V_R + Z \cdot I_R \cdot \frac{Y}{2}$$

$$I_S = \left(Y + Z \cdot \frac{Y^2}{4} \right) V_R + \left(1 + Z \cdot \frac{Y}{2} \right) I_R \dots\dots\dots(15)$$

Pengaturan tegangan nominal T dan nominal π sebagai berikut:

$$V_R = \frac{V_S}{1 + Z \cdot \frac{Y}{2}} \dots\dots\dots(16)$$

Maka,

$$V_R \% = \frac{V_R(NL) - V_R(FL)}{V_R(FL)} \times 100\% \dots\dots\dots(17)$$

2.3. Rugi-Rugi Energi Listrik

Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah selisih tegangan yang terjadi pada suatu penghantar akibat aliran arus listrik. Secara umum, besarnya jatuh tegangan dalam sistem tenaga listrik sebanding dengan panjang saluran dan besar beban, namun berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Menurut SPLN No. 72 (1987), batas jatuh tegangan yang diperbolehkan dalam distribusi listrik adalah +5% hingga -10%.

Karena adanya resistansi pada penghantar, tegangan yang diterima oleh konsumen (V_r) akan lebih rendah dibandingkan dengan tegangan yang dikirimkan (V_s). Akibatnya, jatuh tegangan (V_{drop}) merupakan perbedaan antara tegangan di titik awal pengiriman (*sending end*) dan tegangan di titik penerimaan (*receiving end*) dalam sistem tenaga listrik, yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\Delta V = V_S - V_R \dots\dots\dots(18)$$

Dimana:

ΔV = Jatuh Tegangan (V)

V_S = Tegangan saluran terhadap netral pada ujung pengirim (V)

V_R = Tegangan saluran terhadap netral pada ujung penerima (V)

Rugi Daya Saluran Transmisi

Pada saluran transmisi, selain mengalami penurunan tegangan, juga terjadi kehilangan daya. Kehilangan daya ini menunjukkan adanya energi yang terbuang, sehingga daya yang diterima di sisi beban lebih kecil dibandingkan dengan daya yang dikirim dari sisi sumber. Energi yang hilang ini diubah menjadi panas dalam sistem transmisi selama periode tertentu, sehingga jumlah energi yang diterima lebih rendah daripada yang dikirim.

Rugi Daya Aktif

Daya aktif adalah besaran daya yang benar-benar digunakan dan dimanfaatkan oleh beban secara efektif. Satuan yang digunakan untuk menyatakan daya aktif adalah Watt (W). Pada sistem listrik tiga fasa, nilai daya aktif dapat dihitung menggunakan persamaan yang sesuai dengan persamaan berikut:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(19)$$

Rugi-rugi daya aktif dapat ditampilkan dengan persamaan:

$$P_{Losses} = P_S - P_R \dots\dots\dots(20)$$

Dimana:

P_S = Daya Aktif disisi Supply/input

P_R = Daya Aktif disisi Receive/output

Rugi Daya Reaktif

Daya Reaktif merupakan daya yang dihasilkan oleh peralatan listrik. Contoh peralatan yang dapat menghasilkan daya reaktif adalah motor listrik dan transformator. Satuan daya reaktif dinyatakan dalam volt ampere reactive (VAR). Untuk mendapatkan nilai daya reaktif pada listrik tiga phase digunakan persamaan berikut:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots(21)$$

Rugi-rugi daya reaktif dapat ditampilkan dengan persamaan:

$$Q_{Losses} = Q_S - Q_R \dots\dots\dots(22)$$

Dimana:

Q_S = Daya Reaktif disisi Supply/input

Q_R = Daya Reaktif disisi Receive/output

Rugi Daya Semu

Daya semu merupakan daya yang dihasilkan dari perkalian arus efektif atau arus rms (*root mean square*) dengan beda tegangan efektif atau tegangan rms. Satuan daya semu dinyatakan dalam *Volt Ampere* (VA). Untuk penggunaan pada listrik tiga phase persamaan yang digunakan adalah:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(23)$$

Rugi-rugi daya semu dapat ditampilkan dengan persamaan:

$$S_{Losses} = S_S - S_R \dots\dots\dots (24)$$

Dimana:

S_S = Daya Semu disisi Supply/input

S_R = Daya Semu disisi Receive/output

Ke hilangan daya pada saluran transmisi dapat dikurangi dengan beberapa metode, seperti meningkatkan tegangan transmisi, menurunkan resistansi konduktor, dan meningkatkan faktor daya beban (Tobing, 2003). Namun, metode yang paling umum diterapkan adalah peningkatan tegangan transmisi karena berbagai pertimbangan teknis.

Bab 3. Metode Penelitian

3.1. Perancangan

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini disajikan dalam diagram alir pada gambar 15 berikut ini:



Gambar 3. Diagram alir tahapan penelitian

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. *Power Supply* PLN 3 Phase dan 1 Netral dengan tegangan 380-400 Volt AC, untuk menjalankan simulator AEL-BSGC.
2. Simulator AEL-BSGC, sebagai media dan bahan penelitian yang dilengkapi parameter impedansi yang berbeda-beda. Nilai resistansi yang disediakan adalah 15 Ohm, 30 Ohm, dan 45 Ohm. Untuk nilai induktansi yang disediakan adalah 33mH, 78mH, 140mH, 193mH dan 236mH. Dan nilai kapasitansi yang di sediakan adalah 2 μ F, 4 μ F, 6 μ F.
3. PC untuk mengontrol *Trainer Smart Grid* Simulator AEL-BSGC dengan menggunakan sistem SCADA.
4. Laptop untuk mencata data yang diperoleh pada tabel pengujian Perubahan Arus dan rugi rugi energi Listrik.
5. Handphone android, untuk pengambilan gambar dokumentasi.
6. Diasumsikan pada pengujian ini menggunakan kabel Saluran Udara Tegangan Extra Tinggi (SUTET) berjenis ACSR HAWK dengan ukuran diameter 242 mm², resistansi pada suhu 20°C yaitu 0,1200 ohm/km (data kabel pada ACSR standar spesifikasi : ASTM B232-69)[7].

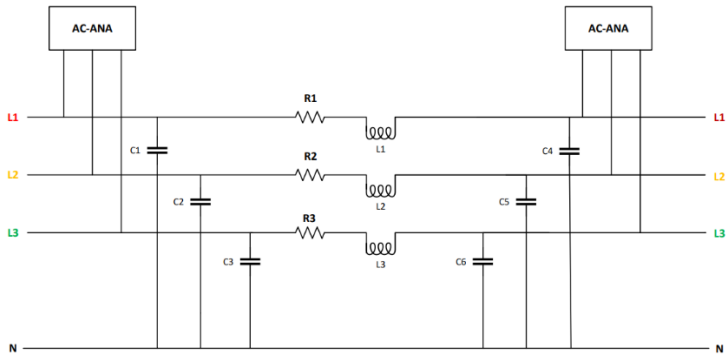
3.3. Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan di institusi pendidikan dengan profil dibawah ini:

- Nama Institusi : Politeknik Negeri Batam
Alamat : Jl. Ahmad Yani, Tlk. Tering, Kec. Batam Kota, Kota Batam, Kepulauan Riau 29461
Lokasi Gedung : Gedung Utama Lab507

3.4. Pengujian

Berikut merupakan rangkaian pengujian jaringan transmisi yang dilakukan pada pada trainer *AEL-BSGC* :



Gambar 4. Wiring diagram rangkain Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mengubah nilai R, L, dan C pada trainer. Data pengujian diperoleh dari display power meter AC- ANA input dan AC-ANA output. Hasil yang diperoleh dari percobaan, dicatat pada tabel data pengujian arus dan tabel data pengujian rugi-rugi energi listrik berikut ini:

Data yang diperoleh dari penelitian merupakan data primer yang akan dijadikan sumber analisis pengaruh Resistansi dan Induktansi terhadap rugi-rugi energi listrik pada sistem transmisi.

Data yang diperoleh, kemudian akan diolah dan ditampilkan dalam bentuk grafik yang akan menampilkan perubahan arus atau rugi-rugi energi dengan lebih jelas. Adapun grafik yang ditampilkan merupakan grafik pengaruh variable terhadap perubahan arus dan rugi-rugi energi listrik. Berikut control grafik yang akan ditampilkan:

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

Jika menggunakan resistansi pada trainer, panjang kabel yang digunakan yaitu:

❖ R=15 ohm :

$$L_{km} = \frac{R_T}{\rho} = \frac{15 \text{ ohm}}{0,120 \Omega/km} = 125 \text{ km}$$

❖ R=30 ohm :

$$L_{km} = \frac{R_T}{\rho} = \frac{30 \text{ ohm}}{0,120 \Omega/km} = 250 \text{ km}$$

❖ R= 45 ohm :

$$L_{km} = \frac{R_T}{\rho} = \frac{45 \text{ ohm}}{0,120 \Omega/km} = 375 \text{ km}$$

Jadi, panjang kabel dengan resistansi 15 ohm yaitu 125 km, sedangkan panjang kabel dengan resistansi 30 ohm yaitu 250 km, dan panjang kabel dengan resistansi 45 ohm yaitu 375 km.

4.1. Data Hasil Pengujian

4.1.1. Data Hasil Rugi-Rugi Energi Listrik

Data rugi-rugi energi listrik yang diperoleh dari penelitian ini merupakan data perubahan nilai rugi-rugi energi listrik berupa Tegangan fasa ke fasa, Daya Aktif, Daya Reaktif dan Daya semu, pada sistem transmisi yang dipengaruhi oleh nilai resistansi, induktansi dan kapasitansi yang berbeda.

Adapun perubahan rugi-rugi energi yang terjadi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 1. Data Pengujian Impedansi Resistif (R)

No	R (ohm)	Z (ohm)	ΔV (V)	P loss (W)	Q loss (VAR)	S loss (VA)
1	15	15.0	34	77	0	78
2	30	30.0	69.7	142	0	142
3	45	45.0	93.3	178	0	178

Tabel 2. Data Pengujian Impedansi Resistif-Induktif (R-L)

No	R (ohm)	L (mH)	XL (ohm)	Z (ohm)	ΔV (V)	P loss	Q loss	S loss
1	15	33	10.4	18.2	38	83	69	86
2	15	78	24.5	28.7	45	84	149	101
3	15	140	44.0	46.4	57	84	247	121
4	15	193	60.6	62.4	70	80	312	144
5	15	236	74.1	75.6	81	78	354	161
6	30	33	10.4	31.7	73	146	55	148
7	30	78	24.5	38.7	78	147	124	156
8	30	140	44.0	53.2	87	142	207	170
9	30	193	60.6	67.6	97	134	265	181
10	30	236	74.1	79.9	106	130	303	193
11	45	33	10.4	46.2	96	180	48	181
12	45	78	24.5	51.2	100	178	109	186
13	45	140	44.0	62.9	108	173	183	196
14	45	193	60.6	75.5	116	166	235	205
15	45	236	74.1	86.7	125	161	270	214

Tabel 3. Data Pengujian Impedansi Resistif-Capacitif (R-C)

No	R (ohm)	C (μF)	XC (ohm)	Z (ohm)	ΔV (V)	P loss	Q loss	S loss
1	15	2	1592.36	1592.4	34.1	78	-102	83
2	15	4	796.18	796.3	34.1	78	-166	92
3	15	6	530.79	531.0	34.2	79	-270	117
4	30	2	1592.36	1592.6	70	145	-93	151
5	30	4	796.18	796.7	70.9	147	-155	162
6	30	6	530.79	531.6	70.6	148	-249	184
7	45	2	1592.36	1593.0	93.3	178	-87	185
8	45	4	796.18	797.4	94	181	-147	194
9	45	6	530.79	532.7	93.5	183	-236	220

Tabel 4. Data Pengujian Impedansi Resistif-Induktif-Capasitif (R-L-C)

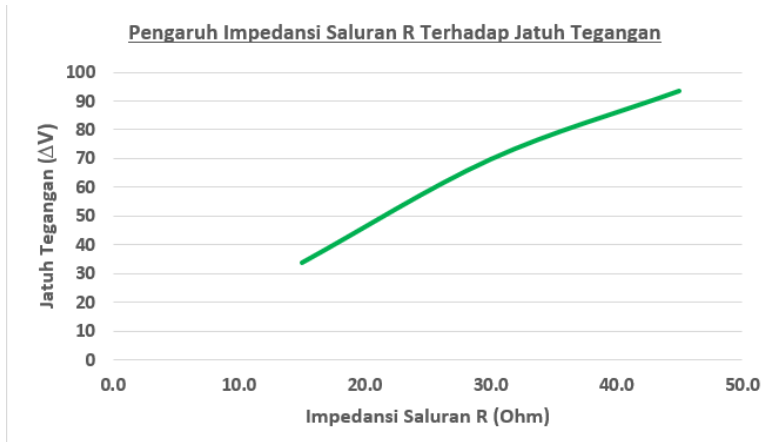
No	R (ohm)	L (mH)	C (μ F)	XL (ohm)	XC (ohm)	Z (ohm)	Δ V (V)	P loss	Q loss	S loss
1	15	33	2	10.4	1592.36	1582.1	36.6	84	-32	84
2	15	78	2	24.5	1592.36	1567.9	41.2	86	52	88
3	15	140	2	44.0	1592.36	1548.5	51.7	87	160	103
4	15	193	2	60.6	1592.36	1531.8	64	84	233	119
5	15	236	2	74.1	1592.36	1518.3	74.7	81	281	134
6	15	33	4	10.4	796.18	786.0	36.5	83	-98	87
7	15	78	4	24.5	796.18	771.8	41.3	87	-9	87
8	15	140	4	44.0	796.18	752.4	50.2	87	100	94
9	15	193	4	60.6	796.18	735.7	62.2	85	174	104
10	15	236	4	74.1	796.18	722.2	73	83	225	117
11	15	33	6	10.4	530.79	520.6	34.6	88	-202	109
12	15	78	6	24.5	530.79	506.5	37.1	91	-113	94
13	15	140	6	44.0	530.79	487.1	45.3	93	6	92
14	15	193	6	60.6	530.79	470.4	55.5	91	90	96
15	15	236	6	74.1	530.79	456.9	64.7	88	149	103
16	30	33	2	10.4	1592.36	1582.3	72.6	150	-36	151

No	R (ohm)	L (mH)	C (μ F)	XL (ohm)	XC (ohm)	Z (ohm)	ΔV (V)	P loss	Q loss	S loss
17	30	78	2	24.5	1592.36	1568.2	76	150	36	150
18	30	140	2	44.0	1592.36	1548.7	83.7	148	127	158
19	30	193	2	60.6	1592.36	1532.0	92.9	142	191	166
20	30	236	2	74.1	1592.36	1518.5	101.9	139	234	176
21	30	33	4	10.4	796.18	786.4	72.3	151	-97	155
22	30	78	4	24.5	796.18	772.3	75.3	151	-23	152
23	30	140	4	44.0	796.18	752.8	83.2	151	68	154
24	30	193	4	60.6	796.18	736.2	91.6	145	132	156
25	30	236	4	74.1	796.18	722.7	99.9	139	178	159
26	30	33	6	10.4	530.79	521.3	71.5	153	-191	175
27	30	78	6	24.5	530.79	507.2	73.1	158	-117	167
28	30	140	6	44.0	530.79	487.7	78.7	158	-21	158
29	30	193	6	60.6	530.79	471.1	86.7	153	53	154
30	30	236	6	74.1	530.79	457.7	94	146	104	153
31	45	33	2	10.4	1592.36	1582.6	95.1	185	-38	186
32	45	78	2	24.5	1592.36	1568.5	98.8	186	26	186
33	45	140	2	44.0	1592.36	1549.1	105.3	182	106	189

No	R (ohm)	L (mH)	C (μ F)	XL (ohm)	XC (ohm)	Z (ohm)	ΔV (V)	P loss	Q loss	S loss
34	45	193	2	60.6	1592.36	1532.4	113.1	177	166	194
35	45	236	2	74.1	1592.36	1518.9	120.9	170	204	199
36	45	33	4	10.4	796.18	787.1	96	185	-97	193
37	45	78	4	24.5	796.18	773.0	98.6	186	-34	187
38	45	140	4	44.0	796.18	753.6	104.7	184	48	185
39	45	193	4	60.6	796.18	737.0	112.1	180	108	187
40	45	236	4	74.1	796.18	723.5	119.2	172	146	187
41	45	33	6	10.4	530.79	522.4	95.1	190	-188	212
42	45	78	6	24.5	530.79	508.3	96.2	192	-120	203
43	45	140	6	44.0	530.79	488.9	101.1	192	-35	192
44	45	193	6	60.6	530.79	472.3	107.9	188	29	188
45	45	236	6	74.1	530.79	458.9	114.2	181	75	185

4.2. Pembahasan

4.2.1. Pengaruh impedansi saluran R terhadap jatuh tegangan



Gambar 5. Grafik pengaruh impedansi saluran R terhadap jatuh tegangan

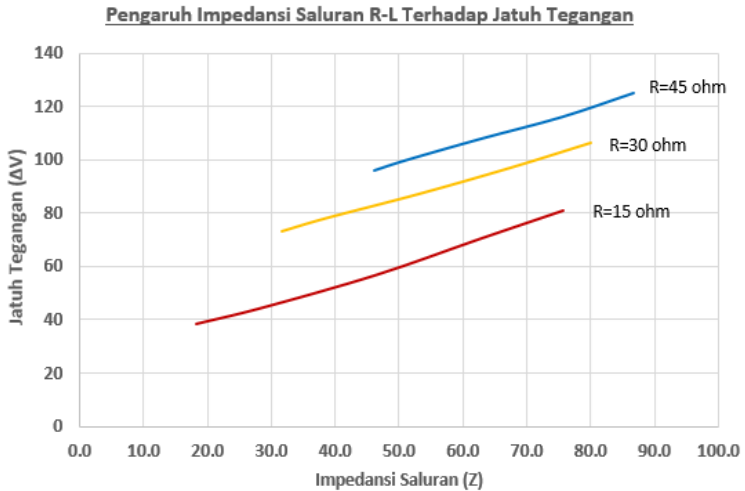
Gambar 5 tersebut menunjukkan hubungan antara impedansi saluran resistif (R) dengan jatuh tegangan (ΔV) pada saluran transmisi. Terlihat bahwa semakin besar nilai impedansi saluran R, maka jatuh tegangan meningkat secara signifikan. Peningkatan ini bersifat linier-mendekati, yang menandakan bahwa penambahan hambatan pada saluran menyebabkan bertambahnya rugi tegangan secara proporsional. Hal ini sejalan dengan hukum Ohm, di mana tegangan yang jatuh pada suatu komponen sebanding dengan nilai resistansi dan arus yang mengalir.

Jika dihitung menggunakan rumus yaitu:

$$\Delta V = I \times R = 2,2 \text{ ampere} \times 15 \Omega = 33,4 \text{ V}$$

terdapat persamaan antara data pengujian dengan perhitungan secara teori.

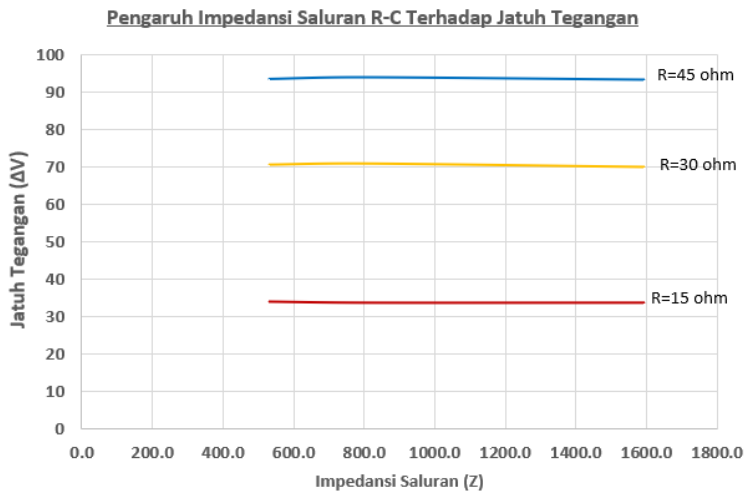
4.2.2. Pengaruh impedansi saluran R-L terhadap jatuh tegangan



Gambar 6. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L terhadap jatuh tegangan

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara impedansi saluran R–L terhadap jatuh tegangan (ΔV) pada 3 nilai resistansi (R) tetap, yaitu 15 ohm, 30 ohm, dan 45 ohm. Terlihat bahwa untuk setiap nilai R, peningkatan impedansi total (Z) menyebabkan kenaikan ΔV secara hampir linier. Garis dengan resistansi lebih besar berada pada posisi lebih tinggi, menandakan bahwa resistansi yang lebih tinggi menghasilkan jatuh tegangan yang lebih besar pada nilai impedansi Z yang sama. Selain itu, kemiringan garis menunjukkan sensitivitas ΔV terhadap perubahan Z, di mana perbedaan nilai ΔV antar R tetap konsisten pada seluruh rentang Z. Hal ini menunjukkan bahwa komponen resistif R memberikan kontribusi langsung terhadap besarnya ΔV , sementara komponen induktif turut mempengaruhi nilai impedansi total, sehingga keduanya berperan dalam menentukan besar rugi tegangan pada sistem.

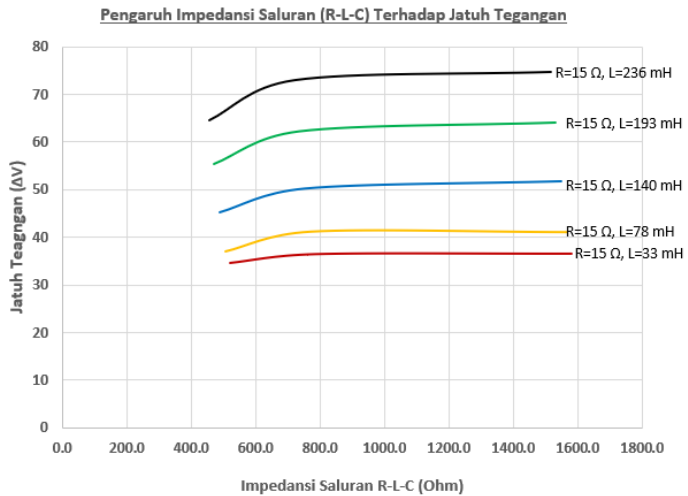
4.2.3. Pengaruh impedansi saluran R-C terhadap jatuh tegangan



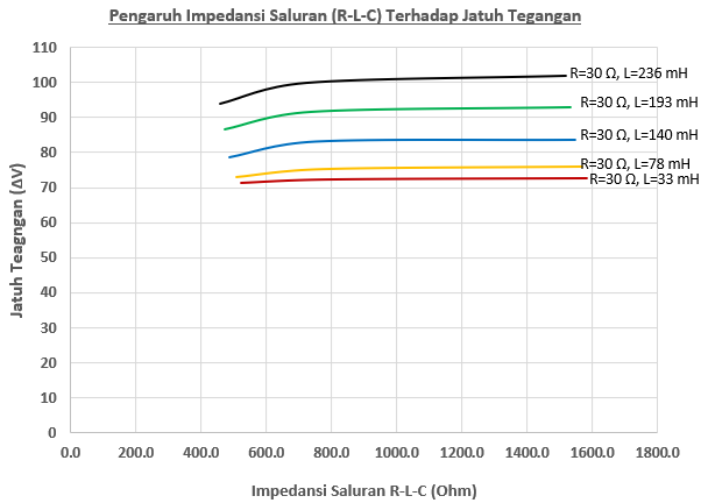
Gambar 7. Grafik pengaruh impedansi saluran R-C terhadap jatuh tegangan

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara impedansi saluran R–C terhadap jatuh tegangan (ΔV) pada tiga nilai resistansi tetap, yaitu 15 ohm, 30 ohm, dan 45 ohm. Terlihat bahwa untuk setiap nilai R, perubahan impedansi total Z dalam rentang besar (sekitar 600 hingga 1600 ohm) hampir tidak mempengaruhi ΔV secara signifikan, karena garis pada grafik cenderung mendatar. Nilai ΔV terutama ditentukan oleh besarnya R, di mana R yang lebih besar menghasilkan ΔV yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pada konfigurasi R–C, kontribusi reaktansi kapasitif cenderung menurunkan pengaruh kenaikan Z terhadap ΔV , sehingga jatuh tegangan menjadi relatif stabil meskipun terjadi perubahan besar pada impedansi total.

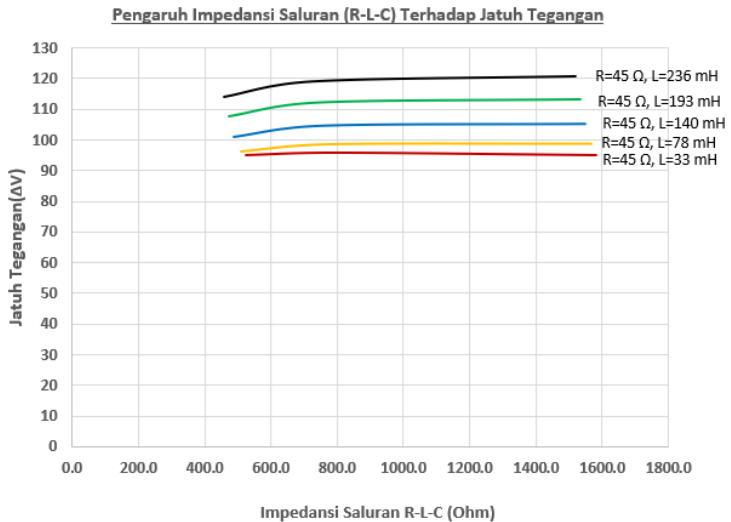
4.2.4. Pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan



Gambar 8. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan



Gambar 9. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan



Gambar 10. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan

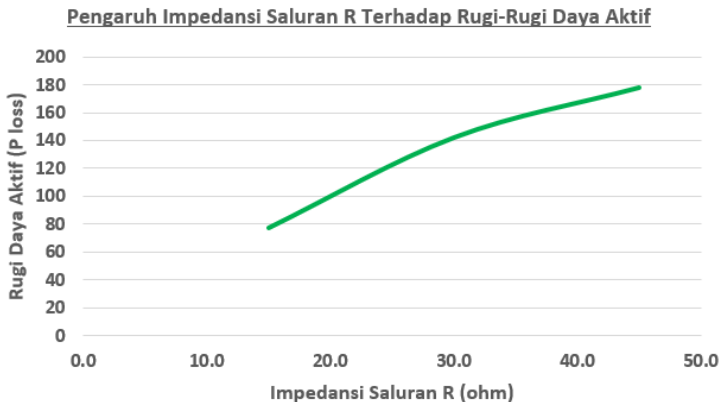
Gambar 8, gambar 9, dan gambar 10 menunjukkan hubungan antara impedansi saluran R-L-C terhadap jatuh tegangan (ΔV) pada tiga nilai resistansi tetap, yaitu 15 ohm, 30 ohm, dan 45 ohm. Ketiga grafik menunjukkan bahwa peningkatan impedansi saluran (Z) pada rangkaian R-L-C selalu diikuti oleh kenaikan jatuh tegangan (ΔV) yang kemudian cenderung stabil pada nilai tertentu. Pola ini konsisten pada semua kombinasi nilai resistansi (R) dan induktansi (L). Nilai jatuh tegangan (ΔV) tertinggi diperoleh pada induktansi terbesar (236 mH) dan terendah pada induktansi terkecil (33 mH). Sementara itu, kenaikan resistansi dari 15 Ω ke 45 Ω menggeser seluruh kurva ke atas secara hampir paralel, yang menunjukkan bahwa resistansi berkontribusi langsung dalam memperbesar rugi tegangan.

Pengaruh induktansi terlihat jelas dari perbedaan posisi kurva pada setiap nilai L . Induktansi yang lebih besar menyebabkan reaktansi induktif meningkat, sehingga menaikkan impedansi total rangkaian. Peningkatan impedansi ini membatasi arus yang mengalir, namun dalam konfigurasi R-L-C, sifat induktif dapat memperbesar selisih fasa tegangan dan arus sehingga jatuh tegangan (ΔV) menjadi lebih besar pada kondisi tertentu. Sebaliknya, induktansi yang lebih kecil menghasilkan reaktansi induktif yang lebih rendah sehingga menurunkan impedansi total dan membuat jatuh tegangan (ΔV) lebih kecil.

Pengaruh perubahan kapasitansi tidak mempengaruhi kenaikan *drop* tegangan (ΔV), namun menurun tetapi tidak signifikan. Hal tersebut terjadi karena dapat muatan listrik sehingga mengurangi arus yang mengalir pada saluran.

Dengan demikian, meskipun resistansi tetap menjadi faktor dominan dalam menentukan besar kecilnya jatuh tegangan, induktansi juga berperan signifikan. Nilai induktansi yang besar akan memperkuat efek resistansi dalam meningkatkan ΔV , sedangkan induktansi yang kecil dapat menahan laju kenaikan ΔV meskipun nilai R besar. Interaksi antara kedua parameter ini menjadi kunci dalam memahami karakteristik jatuh tegangan pada rangkaian R-L-C.

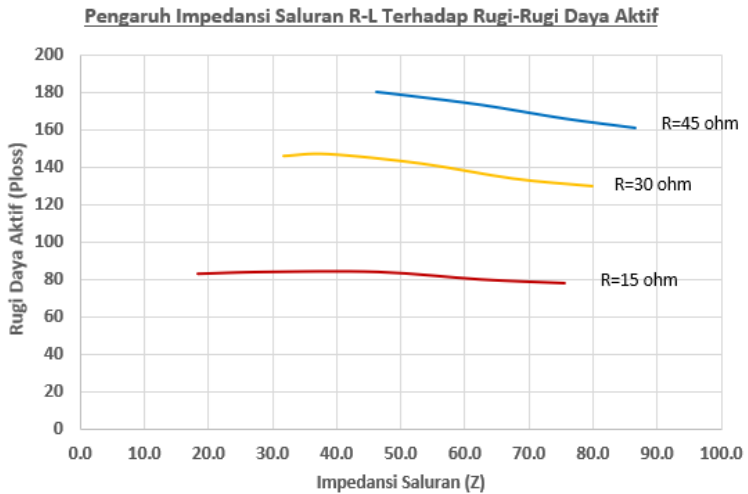
4.2.5. Pengaruh impedansi saluran R terhadap rugi daya aktif



Gambar 11. Grafik pengaruh impedansi saluran R terhadap daya aktif

Gambar 11 menunjukkan hubungan antara impedansi saluran resistif (R) dengan rugi daya aktif (P_{loss}) pada jaringan transmisi. Terlihat bahwa peningkatan nilai R menyebabkan kenaikan rugi daya aktif secara signifikan. Pada rentang R sekitar 15 ohm hingga 45 ohm, rugi daya aktif meningkat dari sekitar 75 Watt menjadi hampir 180 Watt. Pola kenaikan ini konsisten dan sesuai dengan persamaan rugi daya $P_{Loss} = I^2 \times R$, di mana rugi daya berbanding lurus dengan nilai resistansi ketika arus yang mengalir tetap. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar hambatan penghantar, semakin besar pula energi yang hilang dalam bentuk panas, sehingga efisiensi sistem menurun.

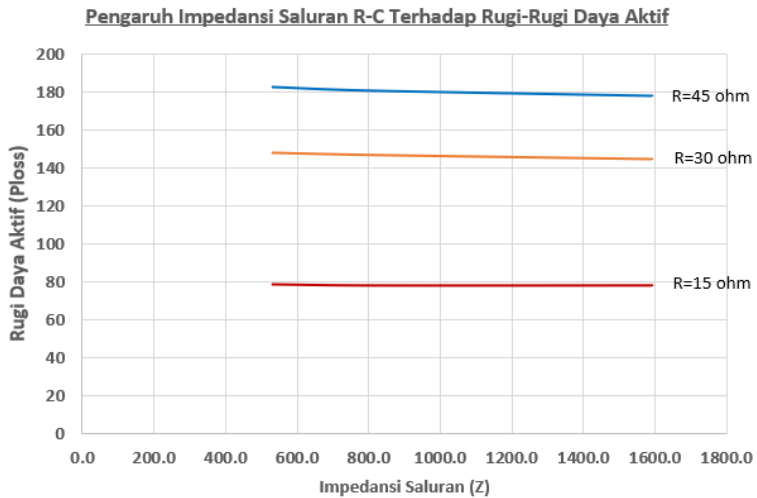
4.2.1. Pengaruh impedansi saluran R-L terhadap rugi daya aktif



Gambar 12. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L terhadap daya aktif

Gambar 12 menunjukkan hubungan antara impedansi saluran R–L terhadap rugi daya aktif (P_{Loss}) untuk tiga nilai resistansi tetap, yaitu 15 ohm, 30 ohm, dan 45 ohm. Terlihat bahwa semakin besar nilai R, semakin tinggi pula rugi daya aktif pada seluruh rentang impedansi Z. Namun, untuk setiap nilai R, rugi daya cenderung menurun perlahan seiring bertambahnya Z. Penurunan ini menunjukkan bahwa komponen induktif pada saluran mengurangi bagian daya aktif yang hilang sebagai panas, karena sebagian energi disimpan sementara dalam medan magnet induktor. Meskipun demikian, perbedaan posisi garis antar nilai R tetap konsisten, menandakan bahwa kontribusi resistansi terhadap rugi daya tetap dominan dibanding pengaruh reaktansi induktif.

4.2.6. Pengaruh impedansi saluran R-C terhadap rugi daya aktif

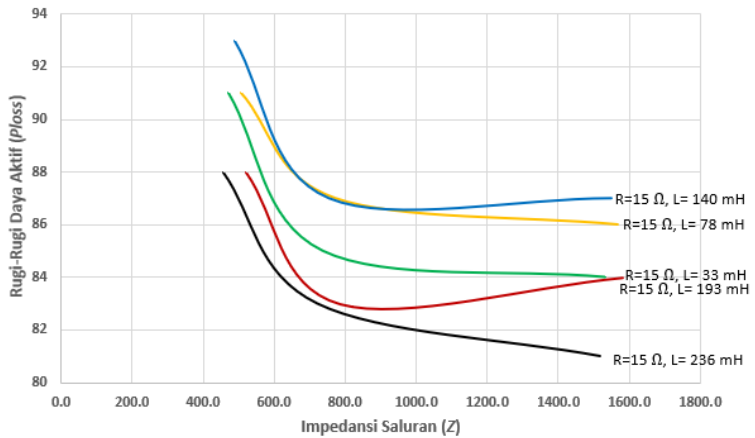


Gambar 13. Grafik pengaruh impedansi saluran R-C terhadap daya aktif

Gambar 13 menunjukkan hubungan antara impedansi saluran R–C terhadap rugi daya aktif (P_{Loss}) untuk tiga nilai resistansi tetap, yaitu 15 ohm, 30 ohm, dan 45 ohm. Terlihat bahwa semakin besar nilai R, rugi daya aktif menjadi lebih tinggi secara konsisten di seluruh rentang impedansi Z. Setiap garis pada grafik cenderung mendatar dengan sedikit penurunan saat Z meningkat, yang menandakan bahwa perubahan impedansi akibat komponen kapasitif tidak memberikan pengaruh besar terhadap rugi daya aktif. Hal ini terjadi karena rugi daya aktif pada rangkaian R–C terutama disebabkan oleh resistansi, sedangkan reaktansi kapasitif hanya mempengaruhi daya reaktif dan tidak secara langsung menambah rugi daya panas pada konduktor.

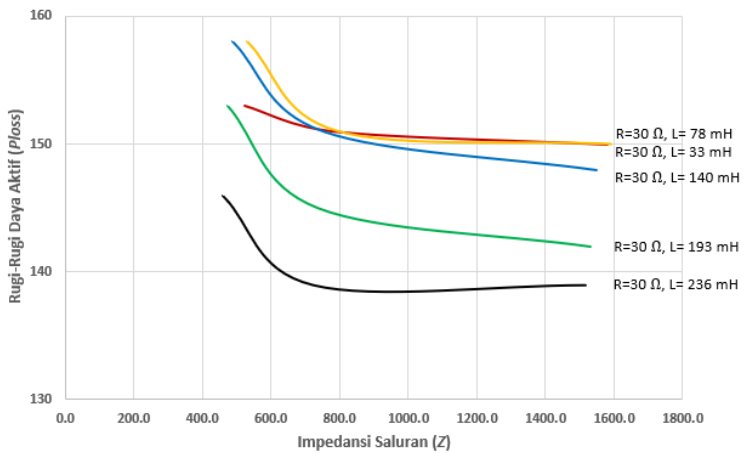
4.2.7. Pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi daya aktif

Pengaruh Impedansi Saluran R-L-C Terhadap Rugi Daya Aktif

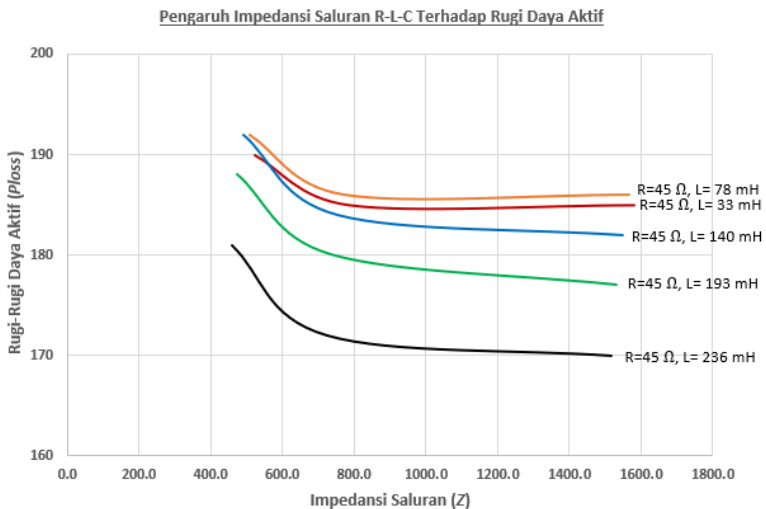


Gambar 14. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya aktif

Pengaruh Impedansi Saluran R-L-C Terhadap Rugi Daya Aktif



Gambar 15. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya aktif



Gambar 16. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya aktif

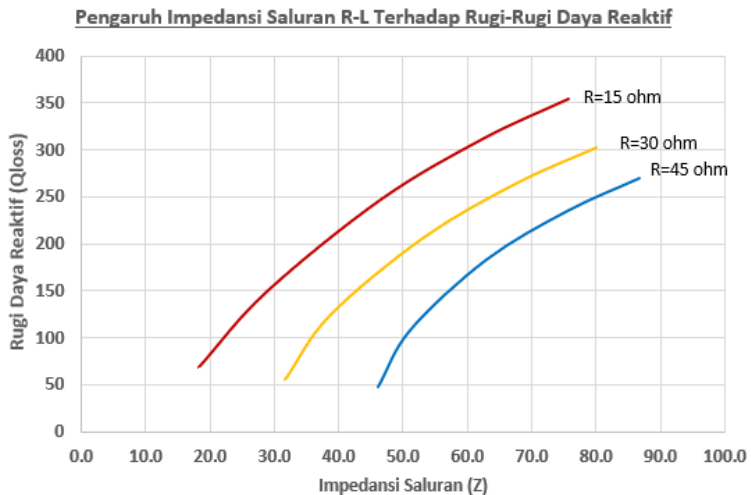
Gambar 14, gambar 15, dan gambar 16 menunjukkan hubungan antara impedansi saluran R–L–C terhadap rugi daya aktif (P_{loss}) untuk tiga nilai resistansi tetap, yaitu 15 ohm, 30 ohm, dan 45 ohm. Ketiga grafik menunjukkan bahwa peningkatan impedansi saluran (Z) pada rangkaian R–L–C umumnya diikuti oleh perubahan rugi daya aktif (P_{Loss}) dengan pola tertentu. Pada Z rendah, rugi daya aktif relatif besar karena arus yang mengalir tinggi, kemudian menurun hingga mencapai titik minimum sebelum kembali meningkat pada Z yang lebih tinggi. Pola ini konsisten pada semua kombinasi R dan L, di mana resistansi berperan langsung sebagai penyebab utama rugi daya, sehingga semakin besar R, semakin tinggi posisi keseluruhan kurva P_{loss} pada seluruh rentang Z .

Pengaruh induktansi (L) terlihat dari perbedaan posisi dan bentuk kurva pada setiap nilai L . Induktansi yang lebih besar meningkatkan reaktansi induktif (X_L), sehingga menggeser nilai Z total ke arah yang lebih tinggi. Hal ini dapat memperbesar rugi daya aktif pada Z rendah karena kondisi mendekati resonansi berkurang, sementara pada Z tinggi efeknya lebih dipengaruhi oleh resistansi. Sebaliknya, induktansi yang lebih kecil membuat kompensasi reaktansi antara L dan C lebih mendekati kondisi resonansi, sehingga arus bisa meningkat pada Z tertentu dan rugi daya aktif menjadi lebih tinggi pada titik tersebut.

Kapasitansi (C) juga berperan penting karena menentukan reaktansi kapasitif (X_C) yang mengimbangi X_L . Peningkatan kapasitansi akan menurunkan reaktansi

kapasitif, mendekati sistem ke kondisi resonansi seri, sehingga arus meningkat dan rugi daya aktif bertambah, terutama pada Z rendah. Sebaliknya, penurunan kapasitif menjauhkan kondisi dari resonansi, membuat arus lebih kecil dan rugi daya aktif berkurang. Efek C ini bersifat konsisten di seluruh kombinasi R dan L , meskipun besarnya pengaruh tergantung pada seberapa dekat sistem berada pada kondisi resonansi.

4.2.8. Pengaruh impedansi saluran R-L- terhadap rugi daya reaktif

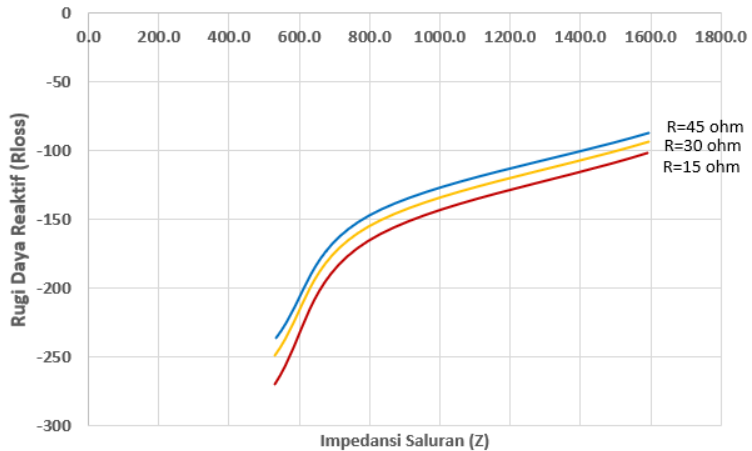


Gambar 17. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L terhadap daya reaktif

Gambar 17 menunjukkan hubungan antara impedansi saluran R–L terhadap rugi daya reaktif (Q loss) untuk tiga nilai resistansi tetap, yaitu 15 ohm, 30 ohm, dan 45 ohm. Terlihat bahwa rugi daya reaktif meningkat seiring bertambahnya impedansi total Z pada setiap nilai R . Menariknya, semakin kecil nilai R , semakin tinggi nilai Q loss pada Z yang sama. Hal ini terjadi karena pada rangkaian R–L, komponen induktif berperan besar dalam membentuk daya reaktif, sementara resistansi justru mengurangi arus yang mengalir dan menurunkan Q loss. Bentuk kurva yang melengkung ke atas menunjukkan bahwa pengaruh komponen induktif terhadap daya reaktif menjadi semakin dominan pada impedansi yang lebih tinggi.

4.2.2. Pengaruh impedansi saluran R-C terhadap rugi daya reaktif

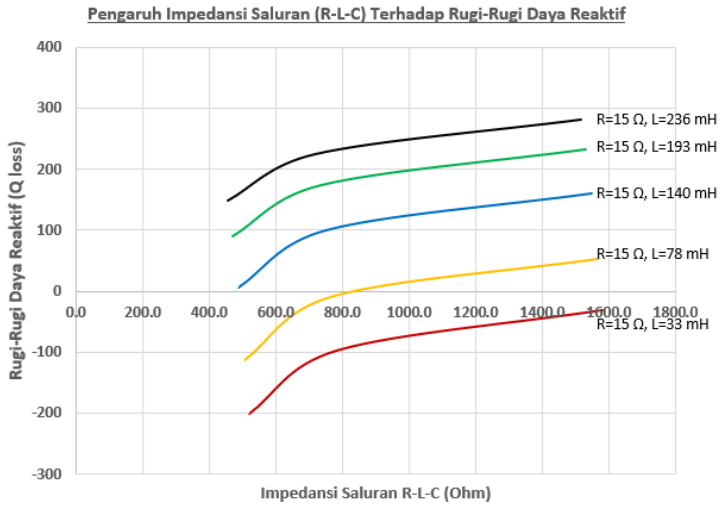
Pengaruh Impedansi Saluran R-C Terhadap Rugi-Rugi Daya Reaktif



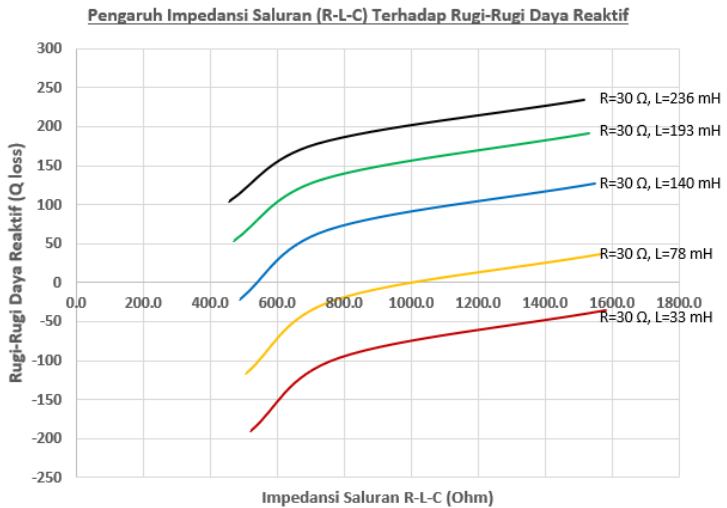
Gambar 18. Grafik pengaruh impedansi saluran R-C terhadap daya reaktif

Gambar 18 menunjukkan pengaruh impedansi saluran R-C terhadap rugi-rugi daya reaktif (Q_{loss}) untuk tiga nilai resistansi berbeda, yaitu $R = 15$ ohm, $R = 30$ ohm, dan $R = 45$ ohm. Terlihat bahwa pada semua nilai R , Q_{loss} bernilai negatif, menandakan dominasi sifat kapasitif yang menyebabkan daya reaktif mengalir dari saluran menuju sumber. Peningkatan impedansi saluran (Z) menyebabkan Q_{loss} bergerak mendekati nol, dengan laju perubahan yang lebih cepat pada rentang Z sekitar 500–800 ohm, kemudian melandai pada nilai Z yang lebih besar. Nilai Q_{loss} dengan resistansi yang lebih besar ($R = 45$ ohm) cenderung sedikit lebih tinggi (kurang negatif) dibanding R yang lebih kecil, menunjukkan bahwa peningkatan resistansi dapat mengurangi besarnya daya reaktif kapasitif yang mengalir dalam sistem.

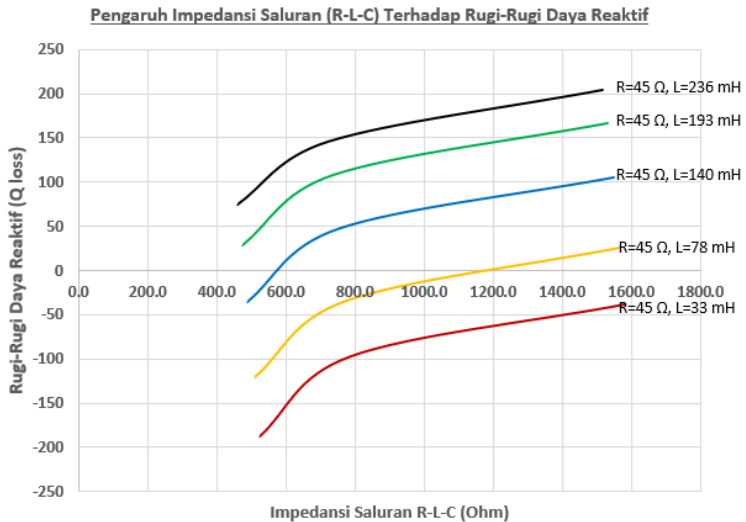
4.2.9. Pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi daya reaktif



Gambar 19. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya reaktif



Gambar 20. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya reaktif



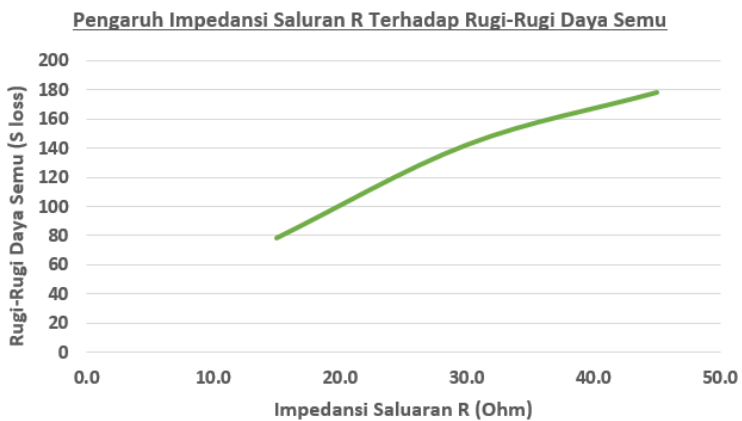
Gambar 21. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya reaktif

Gambar 19, gambar 20, dan gambar 21 menunjukkan pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi-rugi daya reaktif (Q_{loss}) untuk tiga nilai resistansi berbeda, yaitu $R = 15 \text{ ohm}$, $R = 30 \text{ ohm}$, dan $R = 45 \text{ ohm}$. Ketiga grafik menunjukkan pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi-rugi daya reaktif (Q_{loss}) dengan variasi resistansi (R) sebesar $15 \text{ } \Omega$, $30 \text{ } \Omega$, dan $45 \text{ } \Omega$. Pada setiap grafik terlihat bahwa peningkatan nilai induktansi (L) memperbesar rugi-rugi daya reaktif. Kurva dengan induktansi tertinggi (236 mH) selalu berada pada posisi paling atas dengan nilai Q_{loss} paling besar, sedangkan induktansi terkecil (33 mH) berada di posisi paling bawah dan cenderung menghasilkan nilai Q_{loss} negatif pada rentang impedansi tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa peran induktansi sangat dominan dalam membentuk rugi daya reaktif pada sistem transmisi.

Jika dibandingkan antar grafik, terlihat bahwa semakin besar nilai resistansi, maka kurva Q_{loss} bergeser ke bawah. Pada $R=15 \text{ } \Omega$, rugi daya reaktif dapat mencapai lebih dari 300 var , sedangkan pada $R=45 \text{ } \Omega$, nilai maksimumnya hanya sekitar 200 var . Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan resistansi justru menurunkan rugi-rugi daya reaktif, meskipun tetap terjadi perbedaan yang signifikan antara masing-masing nilai induktansi. Dengan kata lain, resistansi berperan sebagai faktor pereduksi dalam rugi daya reaktif, namun tidak mengubah tren utama bahwa induktansi memperbesar rugi daya.

Selain itu, pada ketiga grafik terlihat adanya titik perubahan dari nilai Q loss negatif menuju positif terutama pada kurva dengan induktansi rendah. Fenomena ini disebabkan oleh pengaruh kapasitansi dalam rangkaian R-L-C yang dapat mengimbangi reaktansi induktif, sehingga menghasilkan kompensasi daya reaktif. Semakin besar induktansi, titik peralihan tersebut semakin bergeser ke kanan dan kurva semakin stabil pada nilai positif. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi kapasitansi dan induktansi menentukan arah rugi daya reaktif, sedangkan resistansi lebih memengaruhi besar kecilnya rugi daya yang ditimbulkan.

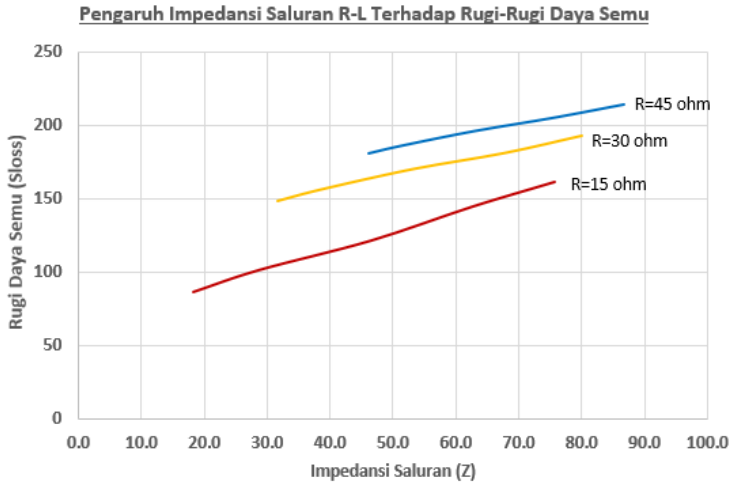
4.2.10. Pengaruh impedansi saluran R terhadap rugi daya semu



Gambar 22. Grafik pengaruh impedansi saluran R terhadap daya semu

Gambar 22 tersebut menunjukkan hubungan antara impedansi saluran R terhadap rugi-rugi daya semu (S_{Loss}) pada sistem kelistrikan. Terlihat bahwa peningkatan nilai impedansi resistif secara konsisten diikuti oleh kenaikan nilai rugi daya semu. Nilai S_{Loss} meningkat dari sekitar 78 VA pada impedansi 15 ohm, menjadi 142 VA pada 30 ohm, dan mencapai sekitar 178 VA pada 45 ohm. Pola ini menunjukkan hubungan positif yang relatif linier antara impedansi resistif dan rugi daya semu, di mana kenaikan resistansi menyebabkan peningkatan tegangan jatuh dan arus yang mengalir, sehingga memperbesar total daya semu yang hilang dalam sistem. Fenomena ini mencerminkan sifat dasar resistansi yang secara langsung mengonversi energi listrik menjadi panas, sehingga rugi daya semu bertambah seiring meningkatnya hambatan.

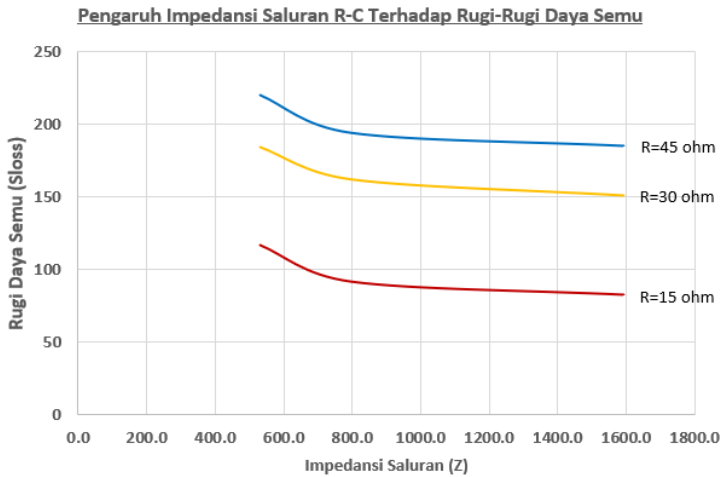
4.2.11. Pengaruh impedansi saluran R-L terhadap rugi daya semu



Gambar 23. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L terhadap daya semu

Gambar 23 menunjukkan pengaruh impedansi saluran R-L terhadap rugi-rugi daya semu (S_{Loss}) untuk tiga nilai resistansi berbeda, yaitu $R = 15$ ohm, $R = 30$ ohm, dan $R = 45$ ohm. Terlihat bahwa peningkatan impedansi saluran (Z) diikuti oleh kenaikan nilai Sloss secara konsisten pada semua nilai R . Nilai Sloss tertinggi terjadi pada $R = 45$ ohm, diikuti $R = 30$ ohm, dan terendah pada $R = 15$ ohm, yang menunjukkan bahwa resistansi yang lebih besar cenderung meningkatkan rugi daya semu. Kenaikan ini bersifat hampir linear pada rentang Z yang diamati, menandakan bahwa kontribusi komponen induktif dan resistif terhadap rugi daya semu relatif stabil tanpa adanya fluktuasi signifikan seperti pada rangkaian yang melibatkan kapasitor.

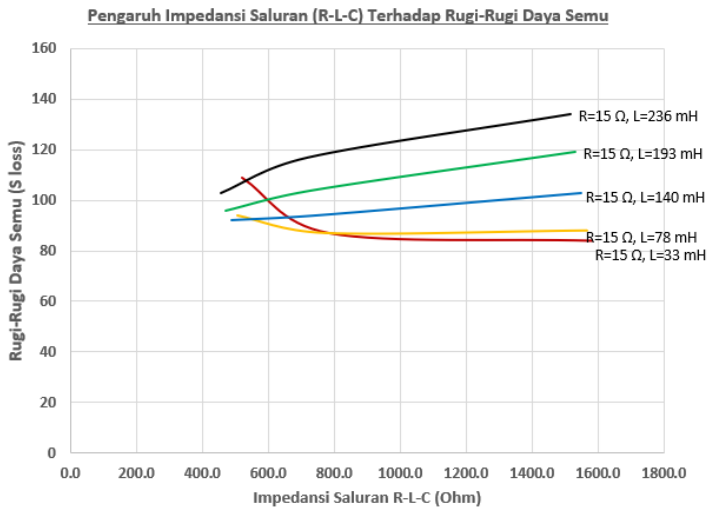
4.2.12. Pengaruh impedansi saluran R-C terhadap rugi daya semu



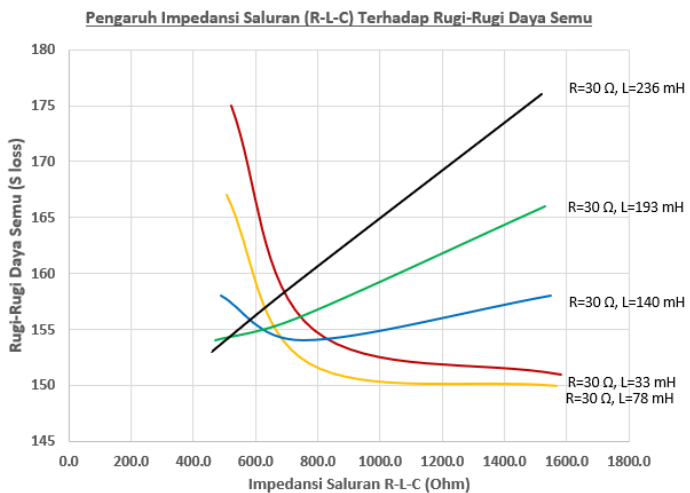
Gambar 24. Grafik pengaruh impedansi saluran R-C terhadap daya semu

Gambar 24 menunjukkan pengaruh impedansi saluran R-C terhadap rugi-rugi daya semu (Sloss) untuk tiga nilai resistansi berbeda, yaitu $R = 15$ ohm, $R = 30$ ohm, dan $R = 45$ ohm. Terlihat bahwa pada semua nilai R , peningkatan impedansi saluran (Z) cenderung menurunkan nilai Sloss, meskipun laju penurunannya semakin kecil setelah Z melewati sekitar 800 ohm. Nilai Sloss tertinggi selalu terjadi pada $R = 45$ ohm, diikuti oleh $R = 30$ ohm, dan terendah pada $R = 15$ ohm, yang menunjukkan bahwa resistansi yang lebih besar meningkatkan rugi daya semu secara keseluruhan. Pola penurunan ini menunjukkan bahwa pengaruh kapasitansi dalam sistem mampu mengurangi rugi daya semu seiring bertambahnya impedansi total, namun resistansi tetap menjadi faktor dominan yang menentukan besarnya kerugian daya.

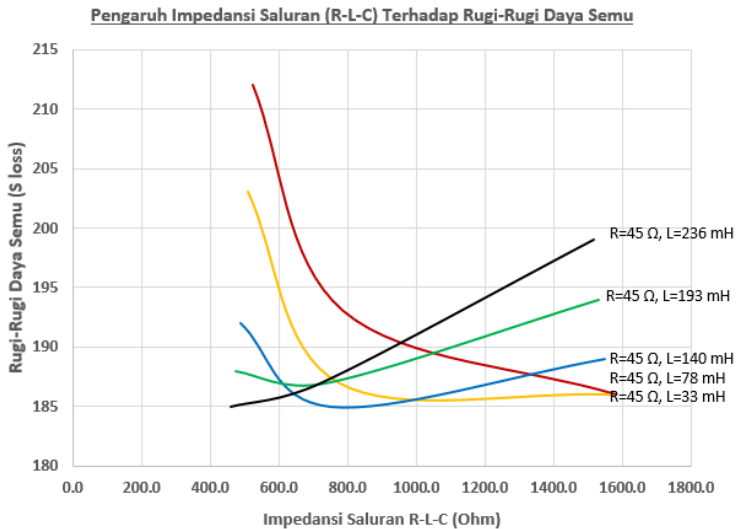
4.2.13. Pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi daya semu



Gambar 25. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya semu



Gambar 26. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya semu



Gambar 27. Grafik pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap daya semu

Gambar 25, gambar 26, dan gambar 27 menunjukkan pengaruh impedansi saluran R-L-C terhadap rugi-rugi daya semu (S_{Loss}) untuk tiga nilai resistansi berbeda, yaitu $R = 15 \text{ ohm}$, $R = 30 \text{ ohm}$, dan $R = 45 \text{ ohm}$. Ketiga grafik memperlihatkan pengaruh variasi impedansi saluran R-L-C terhadap rugi-rugi daya semu (S_{Loss}) dengan resistansi 15Ω , 30Ω , dan 45Ω . Terlihat bahwa perubahan nilai induktansi (L) memberikan dampak signifikan terhadap bentuk kurva, sementara resistansi memengaruhi posisi dan kecenderungan pergeseran rugi daya semu.

Pada grafik dengan $R=15 \Omega$, kurva menunjukkan tren yang relatif stabil. Rugi daya semu cenderung meningkat ketika induktansi lebih besar, terutama pada $L=236 \text{ mH}$ dan $L=193 \text{ mH}$. Sebaliknya, pada nilai induktansi rendah (33 mH dan 78 mH), rugi daya semu lebih kecil dan bahkan cenderung menurun sedikit seiring bertambahnya impedansi. Hal ini menandakan bahwa pengaruh induktansi terhadap daya semu lebih dominan pada kondisi resistansi rendah.

Pada grafik dengan $R=30 \Omega$, terlihat adanya perbedaan pola yang lebih jelas. Kurva dengan L tinggi (236 mH dan 193 mH) cenderung terus meningkat seiring bertambahnya impedansi, sedangkan kurva dengan L rendah (33 mH dan 78 mH) menunjukkan tren menurun cukup tajam setelah melewati titik tertentu. Fenomena ini menunjukkan bahwa adanya interaksi antara induktansi dan kapasitansi dapat menghasilkan efek penurunan rugi daya semu, khususnya pada impedansi menengah hingga tinggi.

Pada grafik dengan $R=45 \Omega$, pola penurunan pada L rendah menjadi semakin dominan. Kurva $L=33 \text{ mH}$ menunjukkan rugi daya semu yang awalnya tinggi namun cepat menurun hingga mendekati stabil. Sementara itu, kurva dengan L tinggi masih menunjukkan kecenderungan naik. Perbandingan ini memperlihatkan bahwa pada resistansi besar, peran induktansi rendah dalam menekan rugi daya semu menjadi lebih signifikan, sedangkan induktansi tinggi tetap menghasilkan rugi daya yang besar.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Impedansi saluran memiliki pengaruh langsung terhadap rugi-rugi daya, di mana resistansi meningkatkan rugi daya aktif, induktansi memperbesar rugi daya reaktif, dan kapasitansi menekannya hingga mencapai kondisi resonansi. Kombinasi ketiga komponen tersebut menentukan besarnya rugi daya semu yang terjadi pada sistem transmisi.
2. Hubungan antara impedansi saluran dan rugi energi bersifat sebanding, sehingga semakin besar nilai impedansi maka semakin besar pula rugi-rugi daya yang timbul. Hal ini menegaskan bahwa impedansi merupakan faktor utama yang menentukan tingkat efisiensi penyaluran energi listrik pada saluran transmisi.

5.2. Saran

1. Untuk mengurangi rugi-rugi daya akibat impedansi saluran, sebaiknya digunakan material konduktor dengan resistansi rendah.
2. Tingkatkan tegangan sistem transmisi untuk mengurangi arus dan kehilangan daya. Seperti sistem tegangan ultra-tinggi (UHV) dapat menjadi solusi.
3. Penelitian selanjutnya dapat memperluas cakupan analisis dengan mempertimbangkan berbagai seperti jenis konduktor dan variasi panjang saluran yang dapat mempengaruhi impedansi pada jaringan transmisi
4. Walaupun simulator yang digunakan pada analisis kapasitasnya kecil, tetapi dengan menggunakan alat ini dapat melakukan penelitian dengan data lapangan.

Daftar Pustaka

- [1] Wibowo, Syah Sigi. (2018). "Analisa Sistem Tenaga", Politeknik Negeri Malang, POLINEMA PRESS, Malang, 2018, pp. 2- 7.
<https://scholar.google.com/citations?user=dPZFWVvKAAAAJ&hl=id&oi=sra>
- [2] R. Syahputra, "Buku Ajar Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik" UMY, Yogyakarta, 2021, pp. 13 – 40.
https://elektro.umy.ac.id/wpcontent/uploads/2023/04/Ramadoni-Syahputra__Transmisi-danDistribusi-Tenaga-Listrik-diktat-2.pdf.
- [3] A. Rofii and R. Ferdinand, "JKTE UTA'45 JAKARTA", *Analisa Penggunaan kapasitor bank dalam upaya perbaikan faktor daya*, vol. 3, pp. 40, Agustus. 2018.
- [4] T. Abrar, "Analisis sistem distribusi 20 kV untuk memperbaiki kinerja dan keandalan sistem distribusi menggunakan Electrical Transient Analysis Program," *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri*, 2012.
- [5] M. Amir and I. Ardhi, "Analisis Susut Tegangan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV," *Institut Sains dan Teknologi Nasional*, vol 22, 2020.
- [6] Practical Exercises Manual, Edibon, 2020, pp. 151-154
- [7] Computer Controlled Smart Grids Application, with SCADA AEL-BSGC, Edibon, 2020, pp. 12.16
- [8] ACSR. "Aluminium Conductor Steel Reinforced." Standart Specification : ASTM B232-69.
- [9] NURDIN, Alimin; AZIS, Abdul. Pengaruh Jarak Antar Sub Konduktor Berkas Reaktansi Induktif Saluran Terhadap Transmisi 150 Kv Dari Gardu Induk Keramasan Ke Gardu Induk Mariana. *Jurnal Ampere*, 2018, 3.2: 145-156.
- [10] KUME, Jeandy Ti; LISI, Fielman; SILIMANG, Sartje. Analisa Gangguan Hubung Singkat Saluran Kabel Bawah Tanah Tegangan 20 kV Penyulang SL 3 GI Teling Manado. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 2016, 5.4: 46-52.
- [11] H. Saadat, "Power Sistem Analysis" MC Graw-Hill Company, USA, 1999, pp. 147.

LAMPIRAN

Aluminium Conductor Steel Reinforced ACSR

Standard Specification : ASTM B232-69

Application : Used for overhead power transmission lines

Construction

Conductor : The center wire or wires of galvanized steel and the outer layer or layers of aluminium



Code Name	Aluminum Cross Section Area		Number / Dia. Of Wire				Overall Diameter Approx.	Approx. Weight of Conductor	DC Resistance at 20°C Max.	Current Carrying Capacity *	Rated Ultimate Strength	Standard Length
	AWG	Metric	Al		GSSW							
			No.	mm	No.	mm						
	MCM	mm ²					mm	kg/km	Ω/km	A	kg	m
Chikadee	398	201	18	3.77	1	3.77	18.9	643	0.1431	500	4,432	5,000
Brant	398	201	24	3.27	7	2.18	19.6	763	0.1439	505	6,592	3,000
Ibis	398	201	26	3.14	7	2.44	19.9	814	0.144	510	7,347	3,000
Lark	398	201	30	2.92	7	2.92	20.5	927	0.1442	510	9,229	3,000
Pelican	477	242	18	4.14	1	4.14	20.7	772	0.1193	565	5,319	3,000
Flicker	477	242	24	3.58	7	2.39	21.5	916	0.11990	570	7,823	3,000
Hawk	477	242	26	3.44	7	2.68	21.8	977	0.1200	570	8,820	2,000
Hen	477	242	30	3.20	7	3.20	22.4	1,113	0.1201	575	10,740	2,000
Osprey	557	282	18	4.47	1	4.47	22.3	900	0.1023	620	6,202	3,000
Parakeet	557	282	24	3.87	7	2.58	23.2	1,068	0.1027	625	8,989	2,000
Dove	557	282	26	3.72	7	2.89	23.5	1,141	0.1027	630	10,301	2,000
Eagle	557	282	30	3.46	7	3.46	24.2	1,298	0.1030	630	12,526	2,000
Peacock	605	307	24	4.03	7	2.69	24.2	1,162	0.09446	660	9,781	2,000
Squab	605	307	26	3.87	7	3.01	24.5	1,240	0.09452	660	11,043	2,000
Wood Duck	605	307	30	3.61	7	3.61	25.3	1,411	0.09472	665	13,132	2,000
Teal	605	307	30	3.61	19	2.16	25.3	1,400	0.09472	665	13,620	2,000
Kingbird	636	322	18	4.78	1	4.78	23.9	1,029	0.08945	675	7,093	2,000
Rook	636	322	24	4.14	7	2.76	24.8	1,220	0.08989	680	10,273	2,000
Grosbeak	636	322	26	3.97	7	3.09	25.2	1,304	0.08989	685	11,408	2,000
Scoter	636	322	30	3.70	7	3.70	25.9	1,483	0.09014	690	13,801	2,000

Remark : • Ambient temperature : 35°C • Wind Velocity : 0.6 m/Sec
• Continuous operating temperature of conductor : 80°C

Biodata



Nama : Oloan Gana Putra Siregar
TTL : Cilegon, 31 Desember 1994
Agama : Islam
Alamat : Prasetya Residence, Batu Besar,
Kecamatan Nongsa, Kota Batam.
Email : oloanganaputra@gmail.com
Riwayat Pendidikan :
D-III : Politeknik Negeri Medan (2013 – 2016)
SLTA : SMKN 1 Portibi (2010-2013)
SMP : SMPN 2 P. Bolak Julu (2007 – 2010)
SD : SD Inpres Batugana (2001 – 2007)