

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Sebagai bahan acuan dalam melakukan penelitian ini penulis menggunakan rujukan sebagai berikut :

Andi Supriyanto (2017) melakukan penelitian tentang Studi Analisis Profil Tegangan dan Rugi-rugi Daya Serta Energi tidak Tersalurkan pada Penyulang OGF15 Bangau Sakti di PT.PLN (Persero) Rayon Panam. Pada penelitian tersebut dilakukan 3 metode untuk mengurangi jatuh tegangan dan rugi-rugi daya yaitu *Load Tap Changer* pada trafo, pemasangan kapasitor bank pada penyulang, dan penggantian luas penampang. Ketiga metode tersebut di simulasikan satu persatu dengan *software* ETAP 12.6.0, berdasarkan pengujian tiap metode dapat diambil kesimpulan bahwa metode pemasangan kapasitor bank pada penyulang adalah metode yang paling optimal karena mampu memperbaiki profil tegangan dan dan mengurangi rugi-rugi daya yang besar.

Restu Dwi Cahyo (2008) melakukan penelitian mengenai Studi Perbaikan Kualitas Tegangan dan Rugi-rugi Daya pada Penyulang Pupur dan Bedak menggunakan Bank Kapasitor, Trafo Pengubah Tap, dan Penggantian Kabel Penyulang. Dari penelitian tersebut perbaikan menggunakan kombinasi tiga metode perbaikan berupa pemasangan bank kapasitor, penggantian kabel penyulang, dan

pengaturan tap trafo pada penyulang Pupur dan Bedak merupakan metode perbaikan yang paling optimal dan handal dalam memperbaiki jatuh tegangan dan rugi-rugi daya yang terjadi pada kedua penyulang tersebut.

2.2. Dasar Teori

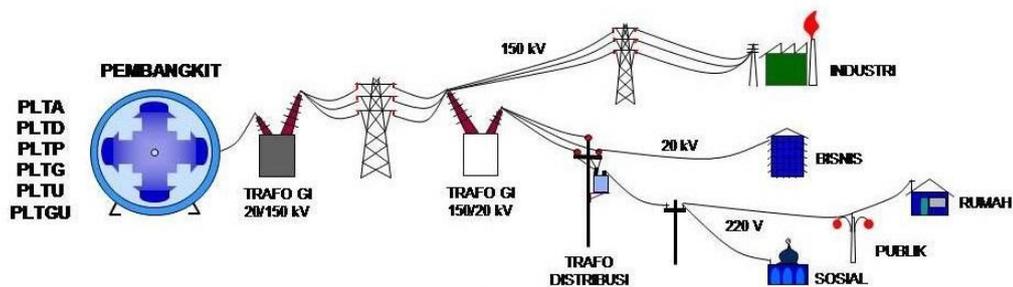
2.2.1 Jaringan Distribusi

Jaringan distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berupa jaringan penghantar yang menghubungkan antara gardu induk pusat beban dan pelanggan. Fungsi jaringan distribusi adalah mendistribusikan energi listrik ke pelanggan sesuai daya dan tegangan yang dibutuhkan. Berdasarkan level tegangannya jaringan distribusi dibagi menjadi dua yaitu jaringan distribusi tegangan menengah (JTM) dan jaringan distribusi tegangan rendah (JTR).

JTM sebagian besar menggunakan jaringan 3 fase 4 kawat, 3 kawat fase dan 1 kawat netral dengan tegangan antar fasenya 20kV, sedangkan sebagian lainnya jaringan 1 fase 2 kawat dengan tegangan 11,5 kV. JTR sebagian menggunakan jaringan 3 fase 4 kawat mirip JTM untuk melayani pelanggan 3 fase dengan tegangan antar fasenya 380 V, sedangkan sebagian lainnya menggunakan jaringan 1 fase 3 kawat dengan tegangan 220 V. Antara jaringan JTR dan JTM dipasang trafo distribusi sesuai dengan kebutuhan, ada yang menggunakan trafo 3 fase, ada yang menggunakan trafo 1 fase. JTM digunakan untuk menghubungkan antara gardu induk dengan trafo distribusi atau dengan pelanggan tegangan menengah. Sedangkan JTR digunakan

untuk menghubungkan antara trafo distribusi dengan pelanggan tegangan rendah. Bila jaringan tegangan rendah dan jaringan tegangan menengah menggunakan tiang yang sama maka kawat netral yang digunakan cukup satu saja, sebagai kawat netral bersama kedua sistem tersebut.

Untuk pelanggan yang menggunakan daya cukup besar, misalnya industri, rumah sakit atau kampus biasanya berlangganan 3 fase dengan tegangan menengah 20 kV. Untuk kepentingan menurunkan tegangan dan pendistribusiannya, pihak pelanggan mengelola gardu distribusi sendiri. Sedangkan pelanggan dengan daya beban yang relatif kecil menggunakan tegangan rendah dan dilayani dengan jaringan distribusi tegangan rendah yang dihubungkan dengan trafo distribusi.

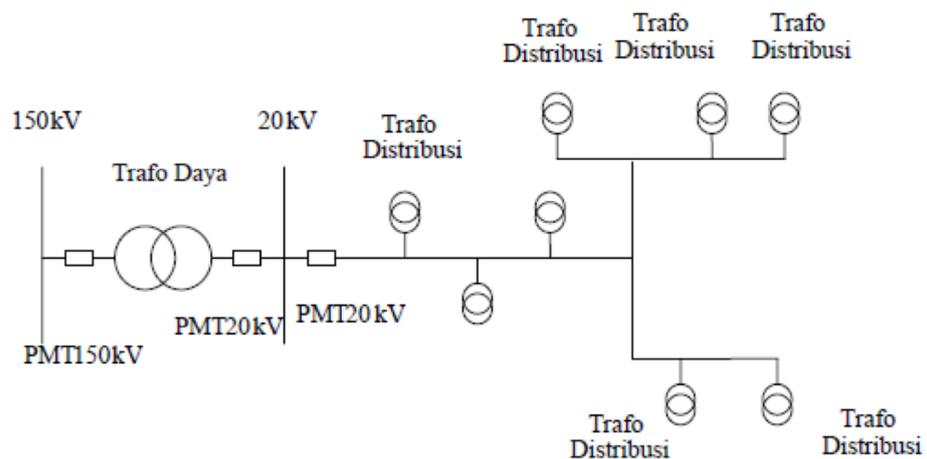


Gambar 2.1 Sistem Jaringan Distribusi
(Sumber : www.satuenergi.com , 2015)

Topologi jaringan distribusi dikelompokkan menjadi dua kelompok yaitu: jaringan radial dan jaringan *loop*.

2.2. 1. 1 Jaringan Radial

jaringan distribusi radial adalah struktur jaringan yang paling sederhana, baik ditinjau dari perencanaannya maupun dari pengusahaannya. Penyaluran tenaga listrik dari penyulang berada pada kondisi satu arah. Akibatnya apabila terjadi gangguan pada salah satu titik pada rangkaian akan menyebabkan keseluruhan jaringan akan terkena dampaknya. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik pada jaringan dengan struktur seperti ini sangat buruk. Karena apabila terjadi perbaikan pada salah satu titik akan menyebabkan seluruh jaringan harus dipadamkan.

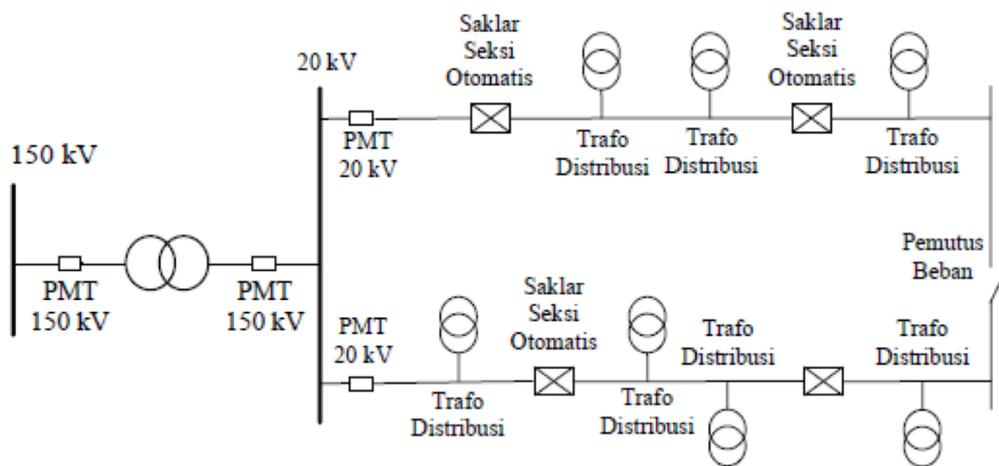


Gambar 2.2 Jaringan Radial
(Sumber : <http://oneforallindo.blogspot.co.id> , 2015)

2.2. 1. 2 Jaringan Loop

Struktur jaringan distribusi lingkaran merupakan struktur jaringan distribusi tertutup yang dimulai dari sumber daya besar (GI) kemudian melewati beberapa gardu gardu distribusi kemudian kembali lagi menuju sumber semula. Kelebihan utama dari

struktur jaringan distribusi ini adalah apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut dapat diisolir sehingga tidak mengganggu jaringan distribusi secara keseluruhan. Hal ini dapat terjadi karena pada struktur jaringan distribusi lingkaran ini terdapat dua titik yang dapat disambungkan secara bergantian atau secara bersamaan. Sehingga kontinuitas penyaluran sudah cukup baik. Walaupun apabila terjadi gangguan pada banyak titik pada rangkaian/serentak, maka keseluruhan jaringan dapat terganggu juga.



Gambar 2.3 Jaringan *Loop*
(Sumber : <http://oneforallindo.blogspot.co.id> , 2015)

2.2.2 Daya Listrik

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya listrik biasanya dinyatakan dalam satuan watt atau *Horsepower* (HP), *Horsepower* merupakan satuan daya listrik dimana 1 HP setara 746 watt atau lbf/second. Sedangkan watt merupakan unit daya listrik dimana 1 watt memiliki daya

setara dengan daya yang dihasilkan oleh perkalian arus 1 amper dan tegangan 1 volt (Laurentius, 2013).

Daya dibangkitkan oleh pusat pembangkit kemudian disalurkan menuju pusat-pusat beban (konsumen). daya di bagi menjadi tiga yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S).

2.2.2.1 Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang dipakai oleh energi sebenarnya atau daya yang digunakan oleh konsumen, satuan daya aktif adalah watt. Persamaan daya aktif dapat dilihat pada persamaan 2.1 berikut :

$$P = V \cdot I \cdot \cos \phi \quad (2.1)$$

Keterangan :

P	= Daya Aktif (Watt)
V	= Tegangan (Volt)
I	= Arus (Amper)
ϕ	= Factor daya

2.2.2.2 Daya Reaktif

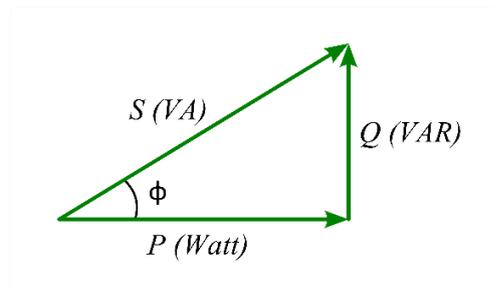
Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk membentuk medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet, satuan daya reaktif adalah VAR. Persamaan daya reaktif dapat dilihat pada persamaan 2.2 berikut :

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \quad (2.2)$$

Keterangan : Q = Daya Reaktif (VAR)
 V = Tegangan fase (Volt)
 I = Arus fase (Amper)
 Ø = Faktor daya

2.2.2.3 Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian Antara tegangan rms dan arus rms dalam suatu jaringan, atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan reaktif. Satuan daya nyata adalah VA



Gambar 2.4 Segitiga Daya

(Sumber: <https://mastermepengineering.files.wordpress.com/2015/02/ilustrasi-segitiga-daya1.png>)

$$S = P^2 + Q^2 \text{ atau } S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

Atau sering dinyatakan

$$S = P + jQ \quad (2.4)$$

Keterangan

S = Daya semu (VA)

P = Daya aktif (Watt)

Q = Daya reaktif (VAR)

2.2.3 Beban Listrik

Dalam suatu rangkaian listrik selalu dijumpai suatu sumber listrik dan beban. Bila sumber listrik bersifat DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC adalah nol. Reaktansi induktif (X_L) akan menjadi nol yang berarti bahwa induktor tersebut akan *short circuit*. Reaktansi kapasitif (X_C) akan menjadi tak berhingga yang berarti bahwa kapasitif tersebut akan *open circuit*. Jadi sumber DC akan mengakibatkan beban induktif dan beban kapasitif tidak akan berpengaruh pada rangkaian. Bila sumber listrik AC maka beban dibedakan menjadi 3 sebagai berikut (Laurentius, 2013):

2.2.3.1 Beban Resistif

Beban resistif merupakan suatu resistor murni, contoh: lampu pijar, pemanas. Beban ini hanya menyerap daya aktif dan tidak menyerap daya reaktif sama sekali. Tegangan dan arus sefasa. Secara matematis dinyatakan (Laurentius, 2013), Persamaan beban resistif dapat dilihat pada persamaan 2.5 berikut :

$$R = V/I \quad (2.5)$$

Keterangan

R = Beban Resistif (Ohm)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Amper)

2.2.3. 2 Beban Induktif

Beban induktif adalah beban yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada sebuah inti biasanya inti besi, contoh: motor-motor listrik, induktor dan transformator. Beban ini mempunyai faktor daya antara 0 - 1 "*lagging*". Beban ini menyerap daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVar). Tegangan mendahului arus sebesar ϕ_0 . secara sistematis dinyatakan (Laurentius, 2013), Persamaan beban induktif dapat dilihat pada persamaan 2.6 berikut :

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.6)$$

Keterangan

X_L = Reaktansi Induksi

f = Frekuensi (Hz)

L = Induktansi (Henry)

2.2.3. 3 Beban Kapasitif

Beban kapasitif adalah beban yang mengandung suatu rangkaian kapasitor. Beban ini mempunyai faktor daya antara 0 - 1 "*leading*". Beban ini menyerap daya aktif (kW) dan mengeluarkan daya reaktif (kVar). Arus mendahului tegangan sebesar ϕ_0 . secara matematis dinyatakan (Laurentius, 2013), Persamaan beban kapasitif dapat dilihat pada persamaan 2.7 berikut :

$$X_C = 1/2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (2.7)$$

Keterangan

X_C = Reaktansi Kapasitif

f = Frekuensi (Hz)

C = kapasitansi (Farad)

2.2.4 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan adalah selisih antara tegangan sumber dengan tegangan penerima. Jatuh tegangan berbanding lurus dengan panjang saluran, arus, hambatan dan impedansi. Semakin besar arus, hambatan, impedansi, dan panjang salurannya maka semakin besar juga jatuh tegangannya. Jatuh tegangan juga berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar dimana bila semakin besar luas penampang penghantarnya maka semakin kecil juga jatuh tegangannya. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan dalam persen maupun dalam volt. Besarnya jatuh tegangan dalam sistem distribusi ditentukan kebijakan perusahaan listrik. Perhitungan jatuh tegangan sederhana pada batas tertentu dapat hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan, khususnya sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya harus diperhitungkan karena nilainya cukup berarti.

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman dan tegangan pada ujung penerimaan tenaga listrik. Tegangan jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan (V_R) dan dinyatakan oleh rumus. 2.8 berikut :

$$V_R = \frac{(V_s - V_r)}{V_r} \times 100\% \quad (2.8)$$

Keterangan :

V_R = Tegangan regulasi

V_S = Tegangan sumber

V_r = Tegangan penerima

Biasanya beban pada suatu sistem tenaga listrik bersifat resistif induktif. Beban tersebut akan menyerap daya aktif dan reaktif dari generator. penyerapan daya reaktif yang diakibatkan beban induktif akan menyebabkan timbulnya jatuh tegangan pada tegangan yang disuplai generator. Akibatnya nilai tegangan disisi penerima akan berbeda dengan nilai tegangan dari sisi (Cahyo, 2008). Persamaan jatuh tegangan dapat dilihat pada persamaan 2.9 Berikut :

$$V_{S1\phi} = V_{r1\phi} + \Delta V_{p1\phi} \quad (2.9)$$

Keterangan

$V_{s1\phi}$ = Tegangan sumber perfase (Volt)

$V_{r1\phi}$ = Tegangan penerima perfase (Volt)

$\Delta V_{p1\phi}$ = Jatuh tegangan perfase (Volt)

Dimana

$$\Delta V_{p1\phi} = IR \cos\phi + IX \sin\phi \quad (2.10)$$

Sehingga persamaan disisi sumber menjadi

$$V_{s1\phi} = V_{r1\phi} + (IR \cos\phi + IX \sin\phi) \quad (2.11)$$

Dan untuk persamaan tiga fase menjadi

$$V_{s3\phi} = (\sqrt{3}xV_{r1\phi} + (\sqrt{3}(IR \cos\phi + IX \sin\phi))) \quad (2.12)$$

Keterangan

$V_{s3\phi}$ = Tegangan sumber antar fase (Volt)

$V_{s1\phi}$ = Tegangan sumber perfase (Volt)

$V_{r1\phi}$ = Tegangan penerima perfase (Volt)

$\Delta V_{p1\phi}$ = Jatuh tegangan perfase (Volt)

I = arus perfase (amper)

R = Tahanan penghantar (Ohm)

X = Reaktansi penghantar (Ohm)

$\cos\phi$ = Faktor daya

$\text{SIN}\phi$ = Faktor daya reaktif

Factor yang mempengaruhi jatuh tegangan adalah :

- a. Besarnya arus yang mengalir
- b. Besarnya beban yang terpasang
- c. Jenis penghantar yang digunakan
- d. Luas penampang penghantar
- e. Panjang penghantar

Dampak yang diakibatkan oleh drop tegangan:

- a. Penurunan level iluminasi pada lampu sehingga menjadi redup
- b. Pemanasan menjadi lebih lambat (pada setrika, kompor listrik dll)
- c. Kesulitan pada waktu starting motor

Cara-cara yang ditempuh untuk mengurangi besarnya drop tegangan pada jaringan distribusi:

- a. Memperbaiki kualitas pemasangan konektor

Perbaikan kualitas pemasangan konektor akan berdampak memperbaiki jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi, dimana perbaikan ini akan mempengaruhi nilai resistansi. Semakin baik pemasangan konektor maka nilai resistansinya akan semakin kecil dan konduktivitas konduktor akan lebih baik dan juga akan mengakibatkan jatuh tegangan dan rugi daya akan semakin kecil. Maka tegangan dan daya di sisi penerima akan semakin baik.

b. Pembangunan *feeder express*

Pembangunan *feeder express* akan mengurangi arus yang mengalir pada jaringan. Hal ini akan berdampak perbaikan terhadap berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi. Berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya akan menaikkan tegangan dan daya yang diterima di sisi beban. Pembangunan *feeder express* dibangun untuk beban yang menginginkan tegangan yang konstan dan daya yang sama seperti daya yang dikirim. Pembangunan *feeder express* biasanya dibangun karena pada jaringan sebelumnya terdapat jatuh tegangan dan rugi daya yang besar yang mengakibatkan daya di sisi terima beban menjadi berkurang.

c. Pembangunan gardu baru

Pembangunan gardu baru dapat dilakukan pada sistem distribusi dengan nilai jatuh tegangan dan rugi daya yang cukup besar akibat penghantar yang terlalu panjang dan perkembangan beban yang tinggi. Pembangunan gardu baru bertujuan untuk membagi jaringan distribusi yang panjang dan beban yang banyak. Dengan membagi panjang jaringan dan beban akan mempengaruhi arus yang mengalir akan semakin kecil dan memperpendek jaringan distribusi ke beban. Hal ini akan berdampak terhadap berkurangnya rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi. Berkurangnya jatuh tegangan dan rugi daya akan menaikkan tegangan dan daya yang diterima di sisi beban.

d. Pemasangan kapasitor bank

Untuk beban bersifat induktif Perbaikan profil tegangan dan rugi daya dapat dilakukan dengan menggunakan kapasitor bank. Biasanya beban yang terdapat pada jaringan distribusi bersifat resistif-induktif. Jadi dalam beban terdapat arus resistif dan arus induktif yang mengalir. Pemasangan kapasitor akan mengalirkan arus kapasitif. Sebagian besar arus induktif pada beban induktif akan terkompensasi oleh arus kapasitif dari kapasitor bank. Jadi pada beban induktif setelah pemasangan kapasitor bank, arus total yang mengalir akan semakin kecil atau bisa dikatakan hanya terdapat arus resistif pada jaringan. Semakin kecilnya arus yang mengalir akan berdampak terhadap perubahan jatuh tegangan dan rugi daya. Semakin kecil arus yang mengalir pada jaringan distribusi maka jatuh tegangan dan rugi daya akan semakin kecil. Dengan kecilnya jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi maka tegangan di sisi penerima beban akan semakin besar dan suplai daya akan semakin besar pula. Selain memperkecil arus yang mengalir memasang kapasitor bank juga dapat meningkatkan nilai faktor daya. Sebab dengan memasang kapasitor bank, akan dapat mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban.

e. Mengubah *Load Tap Changer*

Perbaikan profil tegangan dapat dilakukan dengan menggunakan metode pengaturan tegangan berupa penggunaan *load tap changer*. Dengan menggunakan *load tap changer* dapat mengatur rasio lilitan primer dan sekunder trafo. Dengan

demikian kita dapat mengatur tegangan keluaran trafo. Mengubah *tap changer* hanya akan mempengaruhi nilai tegangannya saja, dimana mengubah *tap changer* akan menaikkan tegangan keluaran (sekunder) dan mengakibatkan tegangan di sisi terima beban akan terjadi kenaikan pula. Dampak perbaikan profil tegangan dengan *load tap changer* tidak akan merubah besarnya nilai jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi. Karena arus yang mengalir pada jaringan distribusi dan impedansi pada jaringan sama seperti keadaan sebelum dilakukannya perubahan *tap changer*.

f. Penggantian Luas Penampang Kabel

Mengganti jenis penghantar dan memperbesar luas penampang penghantar Pengaruh kawat penghantar terhadap jatuh tegangan dan rugi daya adalah berkaitan terhadap nilai resistansi jaringan pada penghantar. Dimana dampak yang terjadi jika nilai resistansi jaringan semakin besar akan mengakibatkan jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi semakin besar kemudian akan mengakibatkan tegangan di sisi penerima beban akan semakin kecil dan daya yang dikirim akan berkurang. Oleh sebab itu untuk memperkecil jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi dilakukan dengan cara memperkecil nilai resistansi jaringan. Hal itu dapat dilakukan dengan mengganti jenis bahan penghantar yang digunakan dengan nilai konduktivitas yang tinggi dan nilai resistivitas yang rendah atau memperbesar ukuran kabel yang artinya akan memperbesar luas penampang dan memperkecil nilai resistansinya.

2.2.5 Rugi daya

Rugi daya adalah besarnya daya yang hilang dalam penyaluran daya listrik yang dikirim oleh sumber daya listrik utama ke suatu beban. Rugi daya pada jaringan distribusi diakibatkan oleh rugi-rugi teknis pada jaringan, dimana rugi-rugi teknis ini dipengaruhi oleh besarnya resistansi dan reaktansi penghantar dalam bentuk rugi daya aktif dan rugi daya reaktif. Rugi daya aktif yang timbul akibat besarnya arus dan nilai resistansi penghantar akan terdisipasi dalam bentuk energi panas. Sedangkan rugi daya reaktif yang timbul akibat besarnya arus dan nilai reaktansi akan terdisipasi dalam bentuk medan magnetik. Rugi daya teknis tidak dapat dihilangkan tetapi dapat diperkecil dengan berbagai usaha seperti perbaikan penambahan kapasitor bank dan penggantian penghantar tetapi usaha ini membutuhkan investasi yang cukup besar sehingga diperlukan lagi usaha yang strategis dan sistematis serta skala prioritas. Sedangkan rugi daya non teknis pada umumnya adalah pemakaian listrik secara ilegal, kesalahan pencatatan alat ukur transaksi energi listrik, akurasi peralatan ukur dan kelemahan sistem administrasi sehingga upaya-upaya penurunannya relatif lebih mudah dan tidak memerlukan biaya besar. Rugi daya teknis yang biasa terjadi pada jaringan distribusi dinyatakan dengan persamaan 2.13 dan 2.14 berikut:

$$P_{losses} = 3 \times I^2 R \quad (2.13)$$

$$Q_{losses} = 3 \times I^2 X \quad (2.14)$$

Dimana

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.15)$$

Keterangan

P_{losses} = Rugi-rugi daya aktif (watt)

Q_{losses} = Rugi-rugi daya reaktif (kVar)

R = Resistansi saluran perfase (Ohm)

X = Reaktansi saluran perfase (Ohm)

I = Arus perfase (amper)

ρ = Resistivitas bahan penghantar (ohm-meter)

l = panjang penghantar (meter)

A = luas penampang saluran (m^2)

Dari rumus diatas dapat disimpulkan bahwa nilai resistansi suatu penghantar menyebabkan rugi-rugi daya pada suatu jaringan distribusi semakin besar nilai resistansi maka rugi-rugidayanya akan semakin besar. Nilai resistansi dipengaruhi oleh bahan penghantar, panjang penghantar, dan luas penampang penghantar.

Panjang penghantar tidak dapat diubah secara bebas karena tergantung jarak trafo distribusi degnan pelanggan. Resistivitas bahan penghantar tergantung dari bahan penghantar yang digunakan. Resistivitas bahan penghantar ini dapat diubah-ubah tergantung dari bahan yang dijadikan sebagai penghantar. Luas penampang penghantar juga dapat diubah-ubah secara bebas, semakin besar luas penampangnya maka semakin

kecil nilai resistansinya sehingga rugi-rugi dayanya dapat ditekan. Namun dalam perubahan luas penampang harus diperhatikan nilai efisiensinya.

Dengan ini untuk mngurangi nilai resistansi atau hambatan pada penghantar dapat dengan mengganti jenis penghantar tersebut sesuai dengan bahan yang digunakan dengan nilai resistivitasnya kecil yang digunakan dan juga mengganti luas penampang penghantarnya.

2.2. 6Perbaikan Profil Tegangan dan Rugi-rugi daya

a. Perbaikan Profil Tegangan

Perbaikan profil tegangan merupakan upaya yang dilakukan untuk mengurangi jatuh tegangan yang terjadi pada jaringan distribusi. Dalam penyediaan tenaga listrik, tegangan yang konstan merupakan salah satu syarat utama yang harus dipenuhi. Tegangan pada bagian-bagian jaringan distribusi memiliki nilai yang berbeda-beda. Oleh karena itu perbaikan profil tegangan harus dilakukan secara merata karena perbaikan tidak dapat dilakukan pada satu bagian dalam sistem yang mengalami penurunan. Perbaikan profil tegangan dapat dilakukan dengan metode pengaturan *load tap changer*, pemasangan kapasitor bank dan memperbesar ukuran penghantar konduktor.

b. Perbaikan Rugi-rugi Daya

Mengurangi rugi-rugi daya merupakan upaya yang dilakukan untuk memperkecil rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi. Rugi daya pada jaringan

distribusi disebabkan oleh rugi-rugi teknis pada jaringan, yaitu rugi-rugi yang disebabkan besarnya nilai tahanan resistansi dan reaktansi pada jaringan. Rugi daya berbanding lurus terhadap arus, panjang jaringan dan besarnya nilai tahanan resistansi dan reaktansi pada jaringan dan berbanding terbalik terhadap luas penampang penghantar. Untuk mengurangi rugi daya dapat dilakukan dengan cara memasang kapasitor bank dan memperbesar ukuran penghantar konduktor.

Pada penjelasan diatas diketahui bahwa untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi daya terdapat dua cara yang sama yakni pemasangan kapasitor bank dan memperbesar ukuran penghantar konduktor sedangkan *load tap changer* hanya akan memperbaiki profil tegangan saja. Berikut penjelasan dari *load tap changer*, Pemasangan kapasitor bank, Memperbesar ukuran penghantar Konduktor.

2.2.6.1 Load Tap Changer

Menurut Cahyo (2008), Perbaikan profil tegangan dapat menggunakan metode pengaturan *load tap changer* yaitu suatu metode dengan pengaturan tegangan. Dengan menggunakan *load tap changer* dapat mengatur rasio lilitan primer dan sekunder trafo. Dengan demikian kita dapat mengatur tegangan keluaran trafo. Pengaturan *load tap changer* hanya akan mempengaruhi nilai tegangannya, dimana mengubah *load tap changer* akan menaikkan tegangan keluaran (sekunder) dan mengakibatkan tegangan di sisi terima beban akan terjadi kenaikan. Dampak perbaikan profil tegangan dengan *load tap changer*

hanya akan menaikkan tegangan keluaran (sekunder) dan tegangan di sisi penerima. Tetapi tidak akan merubah besarnya nilai jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan disitribusi. Karena arus yang mengalir pada jaringan dsitribusi dan impedansi pada jaringan sama seperti keadaan sebelun dilakukannya perubahan *tap changer*. Untuk mendapatkan tegangan keluaran sekunder yang lebih baik dapat dilakukan dengan persamaan 2.16 berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \alpha \quad (2.16)$$

Keterangan

V_p = tegangan primer

V_s = tegangan sekunder

N_p = jumlah lilitan primer

N_s = jumlah lilitan sekunder

α = rasio lilitan

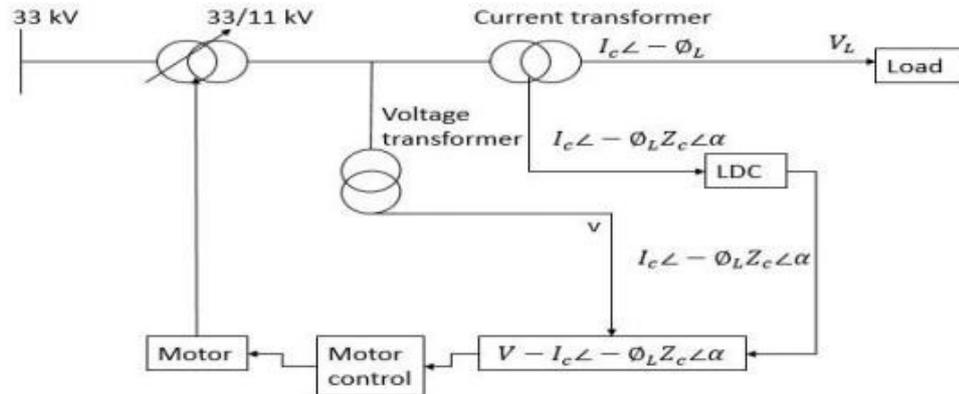
Load Tap Changer dapat digunakan di gardu induk maupun gardu distribusi tergantung dari perbaikan tegangan yang diinginkan.

Pengaturan *load tap changer* pada trafo itu ada dua jenis, yaitu pengaturan tap positif dan negatif. Nilai pengaturan tap trafo menggunakan ukuran persen (%) dengan nilai berervariasi antara $\pm 5\%$ sampai $\pm 15\%$ tergantung dari trafo yang digunakan. Pengaturan tap positif akan meningkatkan jumlah lilitan di sisi sekunder, sedangkan pengaturan tap negatif sebaliknya akan mengurangi jumlah lilitan disisi sekunder. *Load*

tap changer biasanya telah memiliki ukuran tap sendiri tergantung dari pabrik yang memproduksinya. Sehingga pengaturan tegangan dengan menggunakan *load tap changer* sifatnya terbatas dan tergantung dari jenis *Load tap changer* yang digunakan. Semakin banyak rasio pengaturan tap yang dimiliki suatu trafo semakin baik juga proses pengaturan tegangan yang dapat dilakukan (Cahyo, 2008).

Load tap changer itu sendiri ada dua macam yaitu *off-load tap changing transformer* dan *on-load tap changing*. *off-load tap changing* adalah pengaturan *load tap changer* dengan cara memadamkan dulu trafo yang akan di atur, *on-load tap changing* adalah pengaturan *load tap changer* yang dapat dilakukan saat kondisi pembebanan tanpa harus melakukan pemadaman.

Load Tap Changer dapat dilakukan secara manual ataupun secara otomatis. Pengaturan *Load Tap changer* secara manual dianggap tidak efektif karena masih membutuhkan manusia yang harus mengganti pengaturan *load tap changer* setiap terjadi penurunan profil tegangan yang signifikan. Pengaturan *load tap changer* secara otomatis dilakukan menggunakan pengaturan otomatis, yang akan mengatur nilai *load tap changer* saat profil tegangan trafo menurun. Berikut diagram sistem pengendali pada *on-load tap changer* trafo dengan *line drop compensation (LDC)*(Cahyo,2008) :



Gambar 2.5 skematik sistem pengendali on-load-tap-charging transformer dengan *line drop compensation* (LDC)

(sumber : Andi Supriyanto, 2017)

Perubahan tegangan terdeteksi akan mengumpan balik ke pengatur tegangan otomatis yang kemudian akan memerintahkan motor listrik pengubah *tap changer* untuk memindahkan posisi *tap changer* keposisi yang sesuai agar tegangan keluaran trafo kembali konstan. Pengaturan tegangan otomatis itu sendiri harus dijaga agar tidak terlalu peka terhadap perubahan tegangan yang terjadi. Hal ini dapat dilakukan dengan mengatur rangkaian umpan baliknya, sehingga *tap changer* tidak sering bekerja tetapi cukup menjaga ketersediaannya tegangan yang baik (Cahyo, 2008).

Untuk melakukan pengaturan *load tap changer* dapat dengan mengubah-ubah ukuran tap disisi sekunder. Ketika ingin meningkatkan profil tegangan pada bagian sekunder maka dapat dilakukan pengaturan yang akan menambahkan lilitan di sisi sekunder trafo (tap positif). Sehingga nilai tegangan disisi sekunder akan mengalami

peningkatan, namun untuk menurunkan tegangan dapat dilakukan dengan menurunkan jumlah lilitan pada sisi sekunder trafo (tap negatif).

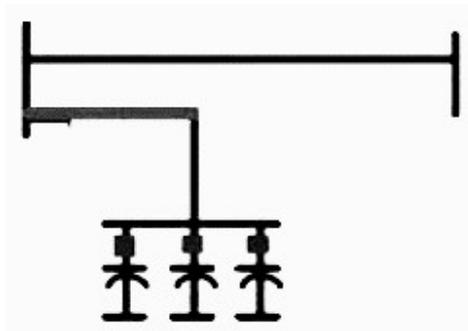
2.2.6.2 Pemasangan Kapasitor Bank

Kapasitor Bank digunakan untuk memperbaiki factor daya dan meningkatkan profil tegangan pada jaringan distribusi suatu penyulang. Pada jaringan distribusi, kapasitor bank berguna untuk mengkompensasi daya reaktif sistem dan memastikan tegangan terjaga pada levelnya pada saat beban penuh (Cahyo, 2008).

Daya reaktif diserap oleh beban yang bersifat induktif sehingga dapat menimbulkan jatuh tegangan disisi. Dengan menambahkan pemasangan kapasitor bank di jaringan distribusi beban mendapatkan suplai daya reaktif. Kompensasi yang dilakukan oleh kapasitor bank mengurangi penyerapan daya reaktif sistem oleh beban, sehingga jatuh tegangan dapat dikurangi (Cahyo, 2008).

Umumnya beban yang terdapat pada jaringan distribusi bersifat resistif-induktif. Jadi dalam beban terdapat arus resistif dan arus induktif yang mengalir. Pemasangan kapasitor akan mengalirkan arus kapasitif. Sebagian besar arus induktif pada beban induktif akan terkompensasi oleh arus kapasitif dari kapasitor bank. Jadi pada beban induktif setelah pemasangan kapasitor bank, arus total yang mengalir akan semakin kecil atau bisa dikatakan hanya terdapat arus resistif pada jaringan. Semakin kecilnya arus yang mengalir akan berdampak terhadap perbaikan profil tegangan dan rugi daya. Semakin kecil arus yang mengalir pada jaringan distribusi maka jatuh

tegangan dan rugi daya akan semakin kecil. Dengan kecilnya jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi maka tegangan di sisi penerima beban akan semakin besar dan suplai daya akan semakin besar pula. Selain memperkecil arus yang mengalir memasang kapasitor bank juga dapat meningkatkan nilai faktor daya. Sebab dengan memasang kapasitor bank akan dapat mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban.



Gambar 2.6 kapasitor bank terhubung dengan bus penyalang

Dengan pemasangan kapasitor bank, nilai daya reaktif yang mengalir ke beban akan berkurang. Sebab beban mendapatkan suplai daya reaktif dari komponen bank kapasitor. Ukuran kapasitor untuk memperbaiki faktor daya sistem pada titik-titik tertentu dapat dihitung dengan bantuan komputer. Perhitungan secara manual dapat dilakukan untuk sistem distribusi yang relative kecil, KVAR kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya dari $\cos \phi_a$ sampai dengan $\cos \phi_b$ dipakai persamaan 2.17 berikut:

$$Q_c = P(\tan \phi_a - \tan \phi_b) \quad (2.17)$$

Keterangan :

Q_c = Kapasitas Kapasitor (kVAr)

P = daya aktif (kW)

$\tan \theta_a$ = tangen sudut faktor daya awal

$\tan \theta_b$ = tangen sudut factor daya yang diinginkan

2.2.6.3 Penggantian Luas Penampang Kabel

Mengganti penghantar dengan ukuran yang lebih besar bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi. Untuk menentukan jenis penghantar baik itu kawat berisolasi maupun kabel, harus ditentukan berdasarkan pertimbangan teknis yang meliputi tegangan nominalnya, konstruksi (ukuran), dan KHA (kuat hantar arusnya). Konstruksi atau luas penampang dari penghantar juga dapat ditentukan dengan melihat rapat arus nominal suatu penghantarnya. Pada dasarnya, penentuan rapat arus ini berhubungan dengan suhu maksimum penghantar yang akan ditimbulkan oleh aliran arus. Rapat arus (S) ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$S = \frac{I}{A} \quad (2.18)$$

Keterangan :

S = rapat arus (A/mm^2)

A = luas penampang kabel (mm^2)

I = arus lewat (A)

Berdasarkan konstruksi dan kuantitasnya juga akan mempengaruhi besarnya nilai resistansi dari penghantar, yang besarnya didasarkan oleh hukum Ohm dalam panas sebagai pengganti satuan listrik, yaitu:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.19)$$

Keterangan :

- R = Resistansi saluran perfase (Ohm)
- ρ = Resistivitas bahan penghantar (ohm-meter)
- l = panjang penghantar (meter)
- A = luas penampang saluran (m²)

Dari persamaan diatas terlihat terdapat tiga parameter yang mempengaruhi nilai resistansi suatu penghantar, yaitu resistivitas bahan penghantar, panjang penghantar dan luas penampang penghantar.

Panjang dari suatu penghantar tergantung dari jarak distribusi ke pelanggan. Sehingga nilai tersebut tidak dapat diubah secara bebas. Sedangkan resistivitas bahan tergantung dari bahan penghantar yang digunakan. Parameter ini dapat diubah-ubah tergantung dari pemilihan bahan penghantar yang digunakan. Selain itu parameter yang dapat diubah-ubah secara bebas adalah luas penampang dari penghantar. Dimana semakin besar penampang dari suatu penghantar akan mengurangi nilai resistansi saluran. Akan tetapi dalam perubahan luas penampang penghantar harus memperhatikan faktor efisiensinya.

Dengan demikian untuk mengurangi resistansi saluran pada jaringan distribusi, kita dapat mengganti jenis bahan penghantar yang digunakan dengan bahan yang nilai resistivitasnya rendah serta memperbesar luas permukaan penghantar.

1. Jenis kawat penghantar

Jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada jaringan distribusi adalah :

a. Tembaga

Tembaga murni merupakan logam liat yang berwarna kemerahmerahan dan mempunyai tahanan jenis $0,0175 \Omega\text{m}$. Tembaga mempunyai daya hantar listrik yang tinggi yaitu $57\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ pada suhu 20°C . Tembaga mempunyai ketahanan terhadap korosi dan oksidasi. Massa jenis tembaga murni pada 20°C adalah $8,96 \text{ g/cm}^3$, titik beku 1083°C . Kekuatan tarik tembaga tidak tinggi yaitu berkisar antara 20 hingga 40 kg/mm^2 , kekuatan tarik batang tembaga akan naik setelah batang tembaga diperkecil penampangnya untuk dijadikan kawat berisolasi atau kabel. Koefisien suhu (α) tembaga $0,004 \text{ per}^\circ\text{C}$. Terdapat 2 macam konduktivitas pada tembaga yaitu Tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%) dan Tembaga dengan konduktivitas 97,5% (Cu 97,5%)

- Kelebihan kawat tembaga

Tembaga merupakan penghantar yang baik dibandingkan aluminium dengan diameter dan luas penampang yang sama besar, tembaga mempunyai konduktivitas dan kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan aluminium, tembaga mempunyai ketahanan terhadap korosi dan oksidasi.

- Kekurangan kawat tembaga

Harga kawat tembaga lebih mahal dibandingkan aluminium, dengan besar hambatan yang sama tembaga lebih berat dari aluminium.

b. Aluminium

Aluminium merupakan suatu logam yang sangat ringan beratnya kira-kira sepertiga dari tembaga dan mempunyai tahanan jenis $0,0285 \Omega\text{m}$. Aluminium mempunyai warna keperak-perakan. Aluminium mempunyai massa jenis $2,7 \text{ g/cm}^3$, α -nya $1,4 \times 10^5$, titik leleh 658°C dan tidak korosif. Daya hantar aluminium sebesar $35 \Omega\text{.mm}^2/\text{m}$ atau kira-kira 61,4% daya hantar tembaga. kekuatan tariknya hanya 9 kg/mm^2 . Aluminium mempunyai konduktivitas 61% (Al 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari beberapa jenis dengan lambang sebagai berikut:

- 1) AAC, *ALL Alluminium conductor* yaitu kabel yang mempunyai inti konduktor yang terbuat dari aluminium tanpa isolasi.
- 2) AAAC, *ALL Alluminium alloy conductor* yaitu kabel yang mempunyai inti konduktor yang terbuat dari campuran logam aluminium tanpa isolasi.

3) ACSR, *Alluminium conductor steell reinforced* yaitu kabel yang berinti alluminium dengan selubung pita baja.

4) ACAR, *Alluminium conductor aloy reinforced* yaitu kabel yang berinti alluminium dengan selubung campuran logam.

- Kelebihan kawat aluminium

Harga kawat aluminium lebih murah dibandingkan tembaga, berat kawat aluminium lebih ringan dengan diameter lebih besar dari tembaga, kemampuan menghantarkan listrik tidak berbeda jauh dengan tembaga jika dikompensasi dengan ukuran kawat yang lebih besar.

- Kekurangan kawat aluminium

Daya hantar listrik maupun daya hantar panas dari aluminium lebih rendah dibandingkan tembaga. Aluminium mempunyai konduktivitas dan kuat tarik yang lebih rendah dibandingkan tembaga dan untuk memperbesar kuat tarik kawat aluminium digunakan campuran aluminium (*aluminium alloy*), aluminium tidak mempunyai ketahanan terhadap korosi dan oksidasi.

2. Pengaruh konduktor penghantar terhadap jatuh tegangan dan rugi-rugi daya

Pengaruh konduktor penghantar terhadap jatuh tegangan dan rugi daya adalah berkaitan terhadap besar atau kecilnya nilai resistansi jaringan pada penghantar.

Dimana dampak yang terjadi terhadap profil tegangan dan rugi daya yaitu jika nilai resistansi jaringan semakin kecil akan mengakibatkan jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi semakin kecil. Kemudian akan mengakibatkan tegangan di sisi penerima beban akan semakin besar dan daya yang dikirim akan bertambah begitu pula sebaliknya. Oleh sebab itu untuk memperkecil jatuh tegangan dan rugi daya pada jaringan distribusi dilakukan dengan cara memperkecil nilai resistansi jaringan. Adapun faktor yang mempengaruhi nilai resistansi suatu penghantar antara lain:

- Panjang Penghantar

Panjang penghantar tergantung dari jarak distribusi ke pelanggan, dimana pada jaringan distribusi jarak penyaluran energi listrik ke pelanggan sangat jauh. Sehingga nilai dari panjang jaringan tidak bisa diubah-ubah secara bebas.

- Luas Penampang

Luas penampang konduktor berbanding terbalik dengan nilai resistansi jaringan, dimana semakin besar penampang dari suatu jaringan penghantar maka akan mengurangi nilai resistansi jaringan. Parameter ini dapat diubah-ubah secara bebas, akan tetapi perubahan luar penampang penghantar harus memperhatikan faktor efisiennya.

- Resistivitas Bahan Penghantar

Resistivitas penghantar tergantung dari jenis bahan penghantar yang digunakan. Resistivitas yang paling kecil pada bahan penghantar yaitu tembaga (Cu) dibandingkan

aluminium (Al). faktor yang mempengaruhi resistivitas pada penghantar yaitu konduktivitas penghantar, dimana tembaga (Cu) mempunyai konduktivitas yang tinggi yaitu $57 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ sedangkan aluminium (Al) mempunyai konduktivitas $35 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ atau 61% dari konduktivitas tembaga. Konduktivitas ini berbanding terbalik terhadap resistivitas, dimana untuk menentukan resistivitas yang lebih kecil maka harus menggunakan jenis penghantar yang mempunyai konduktivitas yang tinggi.

- Temperature

Suhu pada penghantar sangat mempengaruhi terhadap nilai tahanan, dimana semakin tinggi suhu pada penghantar maka akan menyebabkan kenaikan resistivitas penghantar. Hal ini diakibatkan ketika suhu meningkat ikatan atom-atom semakin meningkat akibatnya aliran electron terhambat. Dengan demikian untuk memperkecil jatuh tegangan dan rugi daya pada

Dengan demikian untuk memperkecil jatuh tegangan dan rugi daya pada penghantar. Dapat mengganti jenis bahan penghantar yang digunakan dengan nilai konduktivitas yang tinggi dan nilai resistivitas yang rendah atau mengganti ukuran kabel yang lebih besar yang berarti akan memperbesar luas penampang dan memperkecil nilai resistansi konduktor penghantar. Adapun faktor yang lebih sering digunakan yakni faktor ekonomis, Dimana harga yang murah lebih diminati. Tembaga mempunyai konduktivitas dan kuat tarik yang tinggi akan tetapi mempunyai kelemahan yakni untuk besar hambatan yang sama, tembaga lebih berat dan mahal.

Oleh karena itu pada saat sekarang ini telah banyak digunakan penghantar aluminium, dimana harga yang murah dan juga lebih ringan dari tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari aluminium digunakan campuran aluminium (*aluminium alloy*). Ada beberapa jenis campuran aluminium diantaranya AAC, AAAC, ACSR, ACAR.