

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Permasalahan

Peningkatan kebutuhan tenaga listrik yang pesat akhir-akhir ini menyebabkan perlu penambahan kapasitas saluran transmisi seiring dengan perluasan kapasitas pusat-pusat pembangkit, tetapi membutuhkan peningkatan kemampuan hantar arus yang semakin besar. Untuk meningkatkan kemampuan hantar arus tersebut, maka penghantar yang digunakan harus dibuat dari bahan yang memiliki karakteristik temperatur yang tinggi. Saluran transmisi udara dengan tegangan 150 kV umumnya menggunakan konduktor ACSR yang memiliki batas temperatur kerja yang diijinkan 90 °C

Penggunaan konduktor ACSR dapat mengoptimalkan saluran transmisi dalam menghantarkan arus. Akan tetapi pengoptimalan saluran transmisi dapat menimbulkan kuat tarik dan andongan yang timbul dikawat konduktor. Kuat tarik dan andongan semakin meningkat karena adanya pengaruh internal dan eksternal. Pengaruh internal, diakibatkan adanya perubahan arus saluran. Pada beban puncak mengakibatkan tegangan tarik dan andongan semakin besar. Sedangkan pengaruh eksternal terdiri dari temperatur, tekanan angin, salju dan abu (terdapat di daerah gunung berapi dan di daerah industri, tetapi pengaruhnya terhadap karakteristik mekanis kecil dan dapat diabaikan).

Titik berat permasalahan dalam pembahasan ini yaitu analisa perhitungan terhadap temperatur, tegangan tarik dan andongan karena pengaruh perubahan arus saluran pada konduktor Transmisi

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka, diambil rumusan masalah sebagai berikut :

1. Perhitungan temperatur konduktor akibat perubahan arus saluran
2. Panas yang dibangkitkan oleh konduktor
3. Penyebaran panas konduktor

4. Persamaan keseimbangan panas
5. Perhitungan tegangan tarik dan andongan konduktor

1.3 Tujuan Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik perubahan arus saluran terhadap tegangan tarik dan andongan konduktor, dengan demikian diharapkan dari hasil penulisan ini akan berguna untuk membangun struktur konstruksi saluran transmisi yang sesuai dengan sifat dari konduktor tersebut.

1.4 Batasan Masalah

Pada analisa perhitungan hanya membahas pengaruh perubahan arus saluran terhadap temperatur konduktor, tegangan tarik konduktor dan andongan konduktor. dan tidak membahas pengaruh dari tekanan angin.

1.5 Metodologi Penulisan

Didalam memenuhi dan melengkapi data data yang diperlukan untuk mempermudah penulisan skripsi ini, penulis melakukan berbagai macam metode yaitu dengan cara mempelajari buku – buku yang terkait, baik yang bersumber dari media cetak, elektronik maupun internet. Dilanjutkan dengan melakukan riset pengambilan data pada Gardu Induk Sibolga dan dilanjut dengan bimbingan dengan Dosen pembimbing 1 & 2.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pembahasan, maka Tugas Akhir ini akan dibagi menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I : Pendahuluan

Berisikan tentang latar belakang permasalahan, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penulisan, metodologi pembahasan dan sistematika penulisan.

BAB II : Konstruksi Saluran Transmisi

Berisikan tentang landasan teori yang mendukung dalam pembahasan bab selanjutnya.

BAB III : Konduktor ACSR

Berisikan pembahasan tentang konduktor ACSR dengan menggunakan rumus-rumus untuk mendukung bab selanjutnya.

BAB IV : Saluran Transmisi Sibolga - Tarutung

Berisikan tentang analisis perhitungan besarnya parameter dan efisiensi saluran transmisi Sidikalang – Dolok Sanggul.

BAB V : Penutup

Berisikan tentang kesimpulan dan saran yang merupakan rangkuman dari semua pembahasan.

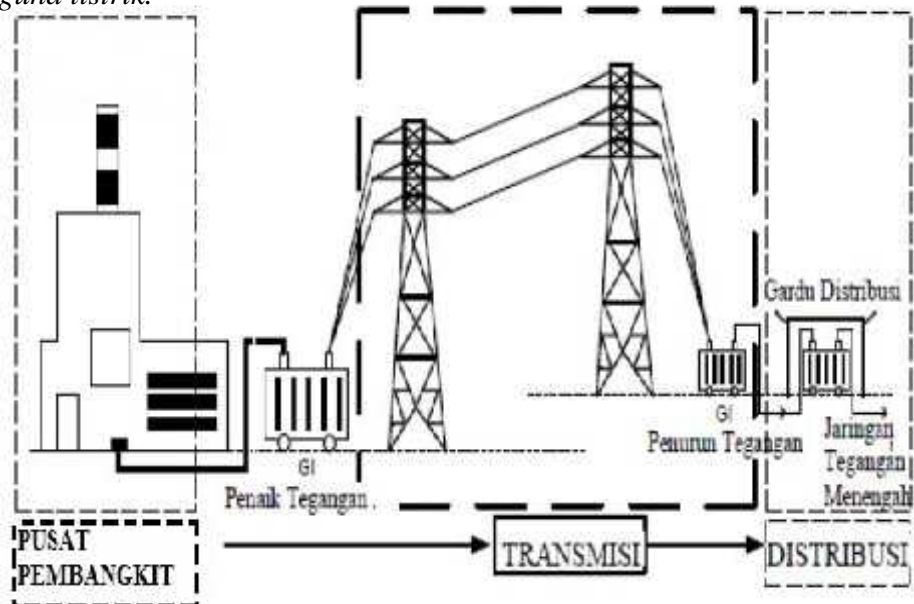
BAB II

KONSTRUKSI SALURAN TRANSMISI

2.1. Umum

Pusat Pembangkit Listrik (Power Plant) yaitu tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak mula (Prime Mover) dan generator yang membangkitkan listrik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-1. Biasanya dipusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain : transformer, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5kV) menjadi tegangan transmisi/tegangan tinggi (150kV) dan juga peralatan pengaman dan pengatur.

Jenis pusat pembangkit yang umum antara lain : PLTA (Pusat Pembangkit Tenaga Air), PLTU (Pusat Pembangkit Tenaga Uap), PLTG (Pusat Pembangkit Tenaga Gas), PLTD (Pusat Pembangkit Tenaga Diesel), PLTN (Pusat Pembangkit Tenaga Nuklir). Proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (Power Plant) hingga saluran distribusi listrik (Substation Distribution) sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik.



Gambar 2-1. Sistem Tenaga Listrik.

Sistem Distribusi merupakan subsistem tersendiri yang terdiri dari : Pusat Pengatur (Distribution Control Center, DCC), saluran tegangan menengah (6 kV dan 20 kV yang biasa disebut tegangan distribusi primer) yang merupakan saluran udara atau kabel tanah, gardu distribusi tegangan menengah yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan menengah dan trafo sampai dengan panel-panel distribusi tegangan rendah (380V,220V) yang menghasilkan tegangan kerja/tegangan jala-jala untuk industri dan konsumen.

2.2. Saluran Transmisi

Saluran transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi hingga pusat beban (konsumen). Tenaga listrik ditransmisikan oleh suatu bahan konduktor yang disebut dengan saluran transmisi listrik. Penyaluran tenaga listrik pada transmisi menggunakan arus bolak-balik (AC) ataupun juga dengan arus searah (DC). Penggunaan arus bolak-balik yaitu dengan sistem tiga-fasa. Saluran transmisi dengan menggunakan sistem arus bolak-balik tiga-fasa merupakan sistem yang banyak digunakan, mengingat kelebihanannya sebagai berikut :

- A. Mudah pembangkitannya.*
- B. Mudah merubah tegangannya.*
- C. Dapat menghasilkan medan magnet putar.*
- D. Dengan sistem tiga fasa, daya yang disalurkan lebih besar dan nilai sesaatnya konstan.*

2.3. Kategori Saluran Transmisi

2.3.1. Saluran Udara

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antara menara atau tiang transmisi disebut saluran

udara (*Overhead Lines*), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-2. Adapun kelebihan dan kekurangan dari saluran udara antara lain :

Kelebihan :

- a. Mudah dalam perbaikan.
- b. Mudah dalam perawatan.
- c. Mudah mengetahui letak gangguan.
- d. Lebih murah (ekonomis).

Kekurangan :

- a. Karena berada di ruang yang terbuka, maka cuaca sangat berpengaruh terhadap keandalannya. Dengan kata lain mudah terjadi gangguan dari luar seperti gangguan hubung singkat, gangguan tegangan bila tersambar petir dan lain sebagainya.
- b. Dari segi estetika/keindahan, saluran udara merusak pandangan sehingga bukan pilihan yang ideal untuk di dalam kota.



Gambar 2-2. Saluran udara (Overhead Lines).

2.3.2. Saluran Kabel Bawah Tanah

Saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang ditanam didalam tanah (Underground Cable), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-3. Kategori saluran kabel bawah tanah ini favorit untuk pemasangan di dalam kota, karena berada didalam tanah maka tidak mengganggu keindahan dan juga tidak mudah terjadi gangguan akibat cuaca namun tetap memiliki kekurangan, antara lain : mahal dalam instalasi dan investasi serta sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya.



Gambar 2-3. Saluran Kabel Bawah Tanah (Underground Cable).

2.4. Klasifikasi Saluran Transmisi Berdasarkan Tegangan

Adapun besaran tegangan saluran transmisi adalah Tegangan Ultra Tinggi (UHV), Tegangan Ekstra Tinggi (EHV), Tegangan Tinggi (HV), Tegangan Menengah (MHV) dan Tegangan Rendah (LV). Standard tegangan tinggi di Indonesia adalah 30 kV, 70 kV dan 150 kV.

Ditinjau dari klasifikasi tegangannya, transmisi listrik dibagi menjadi :

A. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 275 kV – 500 kV

Adapun tujuannya agar drop tegangan dari penampang kawat dapat direduksi secara maksimal, sehingga diperoleh operasional yang efektif dan efisien. Akan tetapi terdapat permasalahan mendasar dalam pembangunan SUTET ialah konstruksi menara atau tower listrik yang besar dan tinggi, memerlukan tanah yang luas, memerlukan isolator yang banyak, sehingga memerlukan biaya besar. Masalah lain yang timbul dalam pembangunan SUTET adalah masalah social, yang akhirnya berdampak pada masalah pembiayaan.

B. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 75 kV – 150 kV

Adapun jarak terjauh yang paling efektif dari saluran transmisi (SUTT) ialah 100 km. Jika lebih dari 100km maka tegangan jatuh (drop voltage) terlalu besar, sehingga tegangan diujung transmisi menjadi rendah.

2.5. Komponen-Komponen Utama Saluran Transmisi

2.5.1. Menara Transmisi

Pada suatu sistem tenaga listrik, energi listrik yang dibangkitkan dari pusat pembangkit listrik ditransmisikan ke pusat-pusat pengatur beban melalui suatu saluran transmisi. Saluran transmisi dapat berupa saluran udara dan saluran bawah tanah namun pada umumnya berupa saluran udara. Energi listrik yang disalurkan lewat saluran transmisi udara pada umumnya menggunakan kawat telanjang sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar tersebut dengan benda sekelilingnya dan untuk menyanggah/merentang kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya, kawat-kawat penghantar tersebut dipasang pada suatu konstruksi bangunan yang kokoh, yang biasa disebut menara/tower. Antara menara/tower listrik dan kawat penghantar disekat oleh isolator.

Konstruksi tower besi baja merupakan jenis konstruksi saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT) ataupun saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET) yang paling banyak digunakan di jaringan PLN karena mudah dirakit terutama untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya, harganya relatif lebih murah dibandingkan dengan penggunaan saluran bawah tanah serta pemeliharaannya yang mudah. Namun perlu pengawasan yang instensif karena besi-besinya rawan terhadap pencurian.

Suatu menara/tower listrik harus kuat terhadap beban yang bekerja padanya, antara lain :

- A. Gaya berat tower dan kawat penghantar (gaya tekan).
- B. Gaya tarik akibat rentangan kawat.
- C. Gaya angin akibat terpaan angin pada kawat maupun badan tower.

Adapun dalam Tabel 2-1 diberikan ketentuan jarak antar tiang atau menara transmisi pada SUTT dan SUTET.

Tabel 2-1. Ketentuan Jarak Antar Tiang atau Menara Pada SUTT dan SUTET.

Saluran Udara	Jarak Antar Tiang atau Menara (m)
SUTT 66 kV Tiang Baja	160
SUTT 66 kV Tiang Beton	60
SUTT 66 kV Menara	300
SUTT 150 kV Tiang Baja	200
SUTT 150 kV Tiang Beton	80
SUTT 150 kV Menara	350
SUTET 275 kV Sirkit Ganda	400
SUTET 500 kV Sirkit Tunggal	450
SUTET 500 kV Sirkit Ganda	450

2.5.1.1. Jenis – Jenis Menara Transmisi

Menurut bentuk konstruksinya (ditunjukkan pada gambar 2-4), jenis-jenis menara/tower listrik dibagi atas 4 macam :



A.Lattice tower.



B.Tubular steel pole.



C.Concrete pole.



D.Wooden pole.

Gambar 2-4. Jenis-Jenis Menara Transmisi.

Menurut fungsinya, menara/tower listrik dibagi atas 7 macam yaitu :

1. *Dead end tower, yaitu tiang akhir yang berlokasi di dekat gardu induk. Tower ini hampir sepenuhnya menanggung gaya tarik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-5.*



Gambar 2-5. Dead End Tower.

2. *Section tower, yaitu tiang penyekat antara sejumlah tower penyangga dengan sejumlah tower penyangga lainnya karna alasan kemudahan saat pembangunan (penarikan kawat), umumnya mempunyai sudut belokan yang kecil, seperti ditunjukkan pada gambar 2-6.*



Gambar 2-6. Section Tower.

3. *Suspension tower, yaitu tower penyangga. Tower ini hampir sepenuhnya menanggung gaya berat, umumnya tidak mempunyai sudut belokan, seperti ditunjukkan pada gambar 2-7.*



Gambar 2-7. Suspension Tower.

4. *Tension tower, yaitu tower penegang. Tower ini menanggung gaya tarik yang lebih besar daripada gaya berat, umumnya mempunyai sudut belokan, seperti ditunjukkan pada gambar 2-8.*



Gambar 2-8. Tension Tower.

5. *Transposition tower, yaitu tower tension yang digunakan sebagai tempat melakukan perubahan posisi kawat fasa guna memperbaiki impedansi transmisi, seperti ditunjukkan pada gambar 2-9.*



Gambar 2-9. Transposition Tower.

6. *Gantry tower, yaitu tower berbentuk portal yang digunakan pada persilangan antara dua saluran transmisi. Tiang ini dibangun di bawah saluran transmisi existing, seperti ditunjukkan pada gambar 2-10.*



Gambar 2-10. Gantry Tower.

7. *Combined tower*, yaitu tower yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda tegangan operasinya, seperti ditunjukkan pada gambar 2-11.



Gambar 2-11. Combined Tower.

2.5.1.2. Konfigurasi Kawat Fasa Menara Transmisi

Menurut konfigurasi, kawat fasa menara/tower terdiri dari 4 jenis, yaitu

:

- 1. Jenis delta, digunakan pada konfigurasi horizontal/mendatar.*
- 2. Jenis piramida, digunakan pada konfigurasi vertikal/tegak.*
- 3. Jenis zig-zag, yaitu kawat fasa tidak berada pada satu sisi lengan.*

Dilihat dari tipe menara/tower listrik (seperti ditunjukkan pada tabel 2-1) dapat dibagi atas beberapa tipe :

Tabel 2-2. Tipe Menara Transmisi 150 kV

TIPE TOWER	FUNGSI	SUDUT
Aa	Suspension	$0^{\circ} - 3^{\circ}$
Bb	Tension/Section	$3^{\circ} - 20^{\circ}$
Cc	Tension	$20^{\circ} - 60^{\circ}$
Dd	Tension	$60^{\circ} - 90^{\circ}$
Ee	Tension	$>90^{\circ}$
Ff	Tension	$>90^{\circ}$
Gg	Transposisi	

2.5.1.3. Komponen-Komponen Menara Transmisi

Secara umum komponen-komponen menara/tower listrik terdiri atas :

- 1. Pondasi, yaitu suatu konstruksi beton bertulang untuk mengikat kaki tower (stub) dengan bumi.*
- 2. Stub, yaitu bagian paling bawah dari kaki tower, dipasang bersamaan dengan pemasangan pondasi dan diikat menyatu dengan pondasi.*
- 3. Leg, yaitu kaki tower yang terhubung antara stub dengan body tower. Pada tanah yang tidak rata perlu dilakukan penambahan atau pengurangan tinggi leg sedangkan body harus tetap sama tinggi permukaannya.*
- 4. Common body, badan tower bagian bawah yang terhubung antara leg dengan badan tower bagian atas (super structure). Kebutuhan tinggi tower dapat dilakukan dengan pengaturan tinggi common body dengan cara penambahan atau pengurangan.*
- 5. Super structure, badan tower bagian atas yang terhubung dengan common body dan cross arm kawat fasa maupun kawat petir. Pada tower jenis delta tidak dikenal istilah super structure namun digantikan dengan "K" frame dan brigde.*

6. *Cross arm*, bagian tower yang berfungsi untuk tempat menggantungkan atau mengaitkan isolator kawat fasa serta clamp kawat petir. Pada umumnya *cross arm* berbentuk segitiga kecuali tower jenis *tension* yang mempunyai sudut belokan besar berbentuk segi empat.
7. “K” *frame* bagian tower yang terhubung antara *common body* dengan *brigde* maupun *cross arm*. “K” *frame* terdiri atas sisi kiri dan kanan yang simetri. “K” *frame* tidak dikenal di tower jenis *piramida*.
8. *Brigde*, yaitu penghubung antara *cross arm* kiri dan *cross arm* tengah. Pada tengah-tengah *brigde* terdapat kawat penghantar fasa tengah. *Brigde* tidak dikenal di tower jenis *piramida*.
9. Rambu tanda bahaya, berfungsi untuk member peringatan bahwa instalasi *SUTT/SUTET* mempunyai resiko bahaya. Rambu ini bergambar petir dan tulisan “AWAS BERBAHAYA TEGANGAN TINGGI”. Rambu ini dipasang di kaki tower lebih kurang 5 meter diatas tanah sebanyak dua buah, dipasang disisi yang menghadap tower nomor kecil dan sisi yang menghadap nomor besar.
10. Rambu identifikasi tower dan penghantar berfungsi untuk memberitahukan identitas tower seperti : nomor tower, urutan fasa, penghantar/jalur dan nilai tahanan pentanahan kaki tower.
11. *Anti Climbing Device (ACD)*, berfungsi untuk menghalangi orang yang tidak berkepentingan untuk naik ke tower. *ACD* dibuat runcing berjarak 10 cm dengan yang lainnya dan dipasang di setiap kaki tower dibawah rambu tanda bahaya..
12. *Step bolt*, yaitu baut panjang yang dipasang dari atas *ACD* ke sepanjang badan tower hingga *super structure* dan *arm* kawat petir. Berfungsi untuk pijakat petugas sewaktu naik maupun turun tower.
13. *Halaman tower*, daerah tapak tower yang luasnya diukur dari proyeksi keatas tanah galian pondasi. Biasanya antara 3 sampai 8 meter di luar *stub* tergantung pada jenis tower.

2.5.2. Isolator

2.5.2.1. Jenis – Jenis Isolator

Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Menurut konstruksi dan penggunaannya dapat dikenal tiga jenis isolator, yaitu :

- A. Isolator jenis pasak.*
- B. Isolator jenis pos saluran.*
- C. Isolator gantung.*

Isolator jenis pasak dan pos saluran digunakan pada saluran transmisi dengan tegangan kerja relatif rendah (kurang dari 22 – 33 kV) sedangkan isolator gantung dapat digandeng menjadi rentengan isolator yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan. Jenis-jenis isolator ini dapat dilihat seperti ditunjukkan pada gambar 2-12.



A. Isolator pasak



B. Isolator Pos Saluran



C. Isolator Gantung

Gambar 2-12. Jenis-Jenis Isolator.

Beberapa persyaratan yang perlu diperhatikan pada isolator adalah sebagai berikut :

- a. Memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi.*
- b. Mempunyai nilai resistivitas yang tinggi untuk memperkecil arus bocor yang terjadi.*
- c. Tahan terhadap masuknya gas-gas ataupun cairan-cairan ke dalam bahab isolator.*
- d. Tidak dipengaruhi oleh perubahan suhu.*

2.5.2.2. Fungsi Isolator

Adapun fungsi dari isolator terdiri dari dua aspek, yaitu :

- 1. Fungsi isolator dari aspek litrik*
 - a. Mengisolasi antara kawat fasa dengan tanah.*
 - b. Mengisolasi antara kawat fasa dengan kawat fasa.*
- 2. Fungsi isolator dari aspek mekanik*
 - a. Menahan berat kawat dari kawat penghantar.*
 - b. Mengatur jarak dan sudut antara kawat dan kawat.*
 - c. Menahan adanya perubahan kawat akibat perbedaan temperatur dan angin.*

2.5.3. Kawat Penghantar

Jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (CU 100%), tembaga dengan konduktivitas 97% (CU 97%) dan aluminium dengan konduktivitas 61% (AL 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut :

- A. AAC (All-Aluminium Conductor) yaitu : kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.*
- B. AAAC (All-Aluminium-Alloy Conductor) yaitu : kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.*
- C. ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) yaitu : kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.*
- D. ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced) yaitu : kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.*

Pada umumnya saluran transmisi yang ada di Indonesia menggunakan jenis kawat penghantar jenis ACSR, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-13.

Karena kawat tembaga mempunyai tahanan yang sama besar, berat dan harga yang lebih mahal dari aluminium. Untuk memperbesar tarik dari aluminium maka digunakan campuran aluminium (Aluminium Alloy).



Gambar 2-13. Kabel ACSR.

Gambar 2-13 memperlihatkan penampang dari suatu kawat penghantar ACSR yang banyak digunakan. Penghantar tersebut terdiri dari 7 serat baja/steel (St) yang membentuk inti tengah sedangkan di sekelilingnya terdapat dua lapisan serat aluminium (Al) dengan 24 serat. Kawat penghantar semacam ini dispesifikasikan sebagai 24Al/7St atau 24/7.

2.5.4. Kawat Tanah

Kawat tanah atau ground wires juga disebut dengan kawat pelindung (shield wire) gunanya untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat fasa terhadap sambaran petir. Jadi kawat tanah ini dipasang diatas kawat fasa.

Sebahagian kawat tanah umumnya dipakai kawat baja (steel wires) yang lebih murah tetapi tidak jarang digunakan ACSR.

BAB III

KUAT TARIK DAN ANDONGAN PADA SALURAN TRANSMISI

3.1 Kuat Tarik dan Andongan

Andongan dan tegangan tarik pada konduktor merupakan dua hal yang sangat penting dipertimbangkan pada saluran transmisi dan saluran distribusi hantaran udara (overhead) karena tegangan tarik pada konduktor dapat menambah beban mekanik pada menara transmisi. Apabila tegangan tarik terlalu besar maka dapat menyebabkan kegagalan mekanik pada konduktor itu sendiri. Faktor yang mempengaruhi andongan dan tegangan tarik pada konduktor adalah :

1. Berat konduktor per satuan panjang
2. Span (jarak antara dua menara transmisi)
3. Temperatur
4. Tegangan konduktor

3.2 Saluran Konduktor

3.2.1 Defenisi Konduktor

Konduktor adalah bahan yang di dalamnya banyak terdapat elektron bebas

mudah untuk bergerak. Tarikan antara elektron yang berada dalam edaran paling luar dan intinya adalah sangat kecil, hingga dalam suhu normal pun ada satu atau lebih elektron yang terlepas dari atomnya. Elektron bebas ini bergerak-gerak secara acak dalam ruang di celah atom-atom. Gerakan elektron-elektron ini dinamakan bauran (difusi). Konduktor yang baik adalah yang memiliki tahanan jenis yang kecil Sebab makin besar tahanan listrik maka makin besar disipasi kalor akibat adanya aliran listrik sehingga makin banyak energi listrik yang hilang. Persamaan Ohm menyatakan bahwa tahanan listrik suatu bahan berbanding lurus dengan panjang dan berbanding terbalik dengan luas penampang. Jadi, untuk memperkecil tahanan listrik kabel maka luas penampang kabel harus diperbesar.. Pada umumnya logam bersifat konduktif. Emas, perak, tembaga, alumunium, zink, besi berturut-turut memiliki tahanan jenis semakin besar. Jadi sebagai penghantar emas adalah sangat baik, tetapi karena sangat mahal harganya, maka secara ekonomis tembaga dan alumunium paling banyak digunakan. Sedangkan konduktor yang kurang baik memiliki tahanan jenis yang besar.

3.2.2. Jenis Bahan Konduktor

Bahan-bahan yang dipakai untuk konduktor harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut:

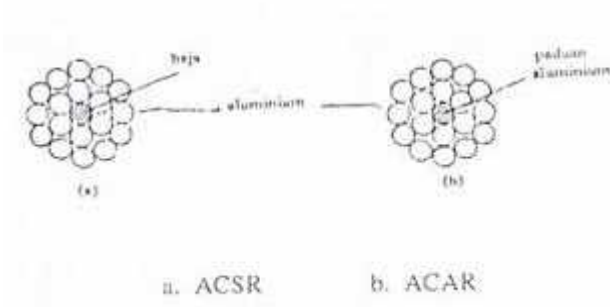
1. Konduktifitasnya cukup baik.
2. Kekuatan mekanisnya (kekuatan tarik) cukup tinggi.
3. Koefisien muai panjangnya kecil.
4. Modulus kenyalnya (modulus elastisitas) cukup besar.

3.2.3 Macam-macam bahan penghantar

Fungsi penghantar pada teknik listrik adalah untuk menyalurkan energi listrik dari satu titik ke titik lain. Contoh bahan penghantar, antara lain : tembaga, aluminium, baja, seng, dl.

1. Aluminium

Aluminium murni mempunyai massa jenis $2,7 \text{ g/cm}^3$, -nya $1,4 \cdot 10^5$, titik leleh 658°C dan tidak korosif. Daya hantar aluminium sebesar 35 m/ohm.mm^2 atau kira-kira 61,4% daya hantar tembaga. Aluminium murni dibentuk karena lunak, kekuatannya hanya 9 kg/mm^2 . Untuk itu jika aluminium digunakan sebagai penghantar yang dimensinya cukup besar, selalu diperkuat dengan baja atau paduan aluminium. Penggunaan yang demikian misalnya pada : ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced). Berikut Gambar Penampang penghantar dari aluminium



Gambar 3.1 Komposisi ACSR

2. Baja

Baja merupakan logam yang terbuat dari besi dengan campuran karbon. Berdasarkan campuran karbonnya, baja dikategorikan menjadi tiga macam, yaitu : baja dengan kadar karbon rendah (0 – 25 %), baja dengan kadar karbon menengah (0,25 – 0,55 %), dan baja dengan kadar karbon tinggi (di atas 0,55 %). Meskipun konduktivitas baja rendah yaitu : $7,7 \frac{m}{\Omega mm^2}$ tetapi digunakan pada penghantar transmisi yaitu ACSR, dimana fungsi baja dalam hal ini adalah untuk memperkuat konduktor aluminium secara mekanis setelah digalvanis dengan seng. Keuntungan dipakainya baja pada ACSR adalah menghemat pemakaian aluminium. Berdasarkan pertimbangan di atas, maka dibuat penghantar bimetal (berbeda dengan termal bimetal pada pengaman) seperti gambar berikut:



Gambar 3.2 penampang ACSR

3.2.4. Kriteria Pemilihan Bahan Logam sebagai Konduktor

Konduktor dalam bidang elektronika adalah bahan yang mampu menghantarkan listrik dengan baik. Bahan penghantar listrik berfungsi untuk mengalirkan arus listrik. Umumnya bahan yang baik digunakan sebagai konduktor listrik adalah logam. Pemilihan logam sebagai bahan konduktor tentu tidak sembarang namun terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan seperti daya hantar listrik, koefisien suhu tahanan, daya hantar panas, kekuatan kuat tarik dan timbulnya gaya elektro motoris termo. Dengan memperhatikan kriteria

pemilihan bahan logam sebagai konduktor tersebut diharapkan kita mampu memilih bahan logam yang tidak hanya sekedar mampu menghantarkan listrik namun juga bersifat efektif serta efisien secara teknis.

a. Daya Hantar Listrik

Arus listrik yang mengalir dalam penghantar selalui mengalami tahanan dari penghantar itu sendiri. Besarnya tahanan tergantung bahannya, dan besarnya tahanan tiap meter dengan penampang 1 mm^2 pada suhu 20^0 C dinamakan tahanan jenis yang dihitung dengan persamaan:

$$R = \frac{\rho \ell}{A} \dots\dots\dots(3.1)$$

atau

$$\rho = \frac{RA}{\ell} \dots\dots\dots(3.2)$$

dimana;

R : besar tahanan dalam satuan ohm,

ℓ : panjang kawat dalam satuan meter,

A : penampang kawat dalam satuan m^2 , dan

ρ : tahanan jenis dalam satuan $\frac{\Omega\text{m}^2}{\text{m}}$

Daya hantar jenis adalah kebalikan dari tahanan jenis, dirumuskan:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \dots\dots\dots(3.3)$$

satuan $\frac{\text{S.m}}{\text{m}^2}$, dimana γ : gamma dan S : Siemens

b. Koefisien Suhu Tahanan

Suatu bahan akan mengalami perubahan isi apabila terjadi perubahan suhu, memuai jika suhu naik dan menyusut jika suhu dingin, tentunya akan mempengaruhi besar nilai tahananannya, yang dapat dihitung dengan persamaan :

$$R = R_0 \{ 1 + \alpha (t - t_0) \} \dots\dots\dots(3.4)$$

Dengan

R₀ : besar tahanan awal (),

R: besar tahanan akhir (),

t₀ : suhu awal (⁰C),

t: suhu akhir (⁰C), dan

α : koefisien suhu tahanan.

c. Daya Hantar Panas

Daya hantar panas ini menunjukkan jumlah panas yang melalui lapisan bahan tiap satuan waktu dalam satuan kkal/m.jam, derajat. Pada umumnya logam

mempunyai daya hantar panas yang tinggi sedangkan pada bahan-bahan bukan logam rendah.

d. Kekuatan Kuat Tarik

Sifat mekanis ini penting untuk hantaran di atas tanah, maka bahan yang dipakai harus diketahui kekuatannya lebih-lebih menyangkut tegangan tinggi. Penghantar listrik dapat berbentuk padat, cair, atau gas. Yang berbentuk padat umumnya logam, elektrolit dan logam cair (air raksa) merupakan penghantar cair,

dan udara yang diionisaikan dan gas-gas mulia (neon), kripton, dan lainnya sebagai penghantar bentuk gas.

3.3 Penghantar Transmisi Tegangan Tinggi

Kawat penghantar yang biasa digunakan (konvensional) untuk saluran transmisi udara adalah kawat penghantar aluminium jenis ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) yaitu kawat berlilit dengan inti serat baja di tengah yang dikelilingi oleh lapisan–lapisan serat aluminium (gambar 3.1) . Konduktor jenis ini mempunyai sifat tahan panas yang terbatas walaupun konduktivitas listriknya tinggi, karena menggunakan bahan aluminium jenis EC grade sehingga tidak dapat memberikan peningkatan kemampuan hantar arus. Pada umumnya konduktor konvensional mempunyai batas temperatur yang diijinkan tidak melebihi 75°C pada pembebanan harian dan pada keadaan beban darurat dapat meningkat hingga 90°C. .Pada umumnya SUTT maupun SUTET menggunakan ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced). Bagian dalam kawat berupa steel yang mempunyai kuat mekanik tinggi, sedangkan bagian luarnya mempunyai konduktivitas tinggi. Karena sifat electron lebih menyukai bagian luar kawat daripada bagian sebelah dalam kawat maka ACSR cocok dipakai pada SUTT/SUTETI. Untuk daerah yang udaranya mengandung kadar belerang tinggi dipakai jenis ACSR, yaitu kawat steelnya dilapisi dengan aluminium.



Gambar 3.3 ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced)

Saat sebuah kawat konduktor direntangkan diantara dua buah titik A dan B maka kawat tersebut akan mengikuti garis lengkung AB yang karena beratnya sendiri akan melengkung kebawah. Besar lengkungan ini akan sangat tergantung dari berat dan panjang kawat. Berat kawat ini yang akan menimbulkan kuat tarik dalam satuan kg/mm^2 pada penampang kawat tersebut. Jika kuat tarik yang dialami oleh kawat konduktor ini terlampau besar maka akan mengakibatkan kawat konduktor putus atau dapat juga mengakibatkan menara penyangga menjadi rusak dan roboh karena tidak dapat menahan tegangan yang timbul. Tegangan tarik yang timbul bukan saja disebabkan oleh berat kawat saja tetapi juga dipengaruhi oleh bermacam-macam beban yang timbul pada kawat tersebut seperti beban angin, beban salju yang melekat pada kawat didaerah yang bercuaca dingin.

Menurut hukum Stokes adanya beban kuat tarik ini akan mengakibatkan bertambah panjangnya kawat sesuai dengan modulus elastisitasnya. Hal lain yang akan mengakibatkan pertambahan panjang adalah pemuaiian karena suhu yang tinggi yang timbul pada konduktor. Suhu yang tinggi ini dapat diakibatkan oleh banyak hal, salah satunya adalah karena timbulnya rugi-rugi tembaga karena arus beban yang lewat pada konduktor tersebut. Semakin besar arus beban yang lewat akan menyebabkan kerugian berupa panas semakin tinggi yang pada akhirnya akan menambah beban berupa panas pada kawat konduktor tersebut.

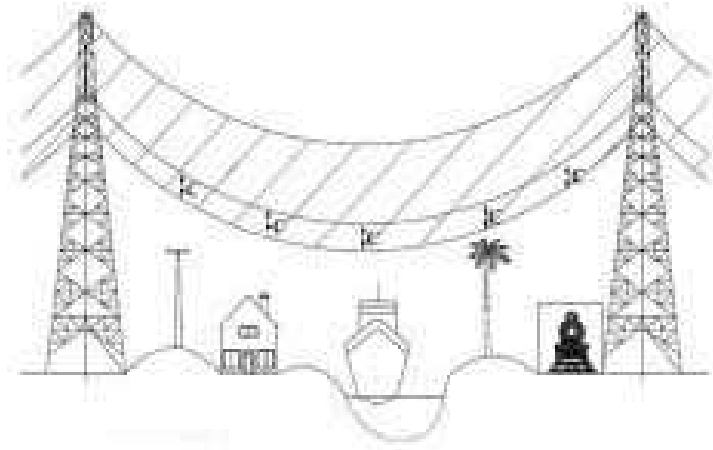
3.3.1 Ruang Bebas (Right Of Way) dan Jarak Aman (Safety Distance)

Ruang Bebas (Right Of Way) adalah ruang yang dibatasi oleh bidang vertikal dan horizontal di sekeliling dan di sepanjang konduktor SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi), SUTET (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi), atau SUTTAS (Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah), di

mana tidak boleh ada benda di dalamnya demi keselamatan manusia, makhluk hidup dan benda lainnya serta keamanan operasi SUTT, SUTET, dan SUTTAS (Kementrian ESDM, 2015).

Jarak Aman atau safety distance merupakan jarak dimana penghantar saluran udara tidak terjangkau oleh tangan manusia dan kendaraan yang berjalan. Jarak bebas minimum vertikal dari konduktor adalah jarak terpendek secara vertikal antara konduktor SUTT, SUTET, atau SUTTAS dengan permukaan bumi atau benda di atas permukaan bumi yang tidak boleh kurang dari jarak yang telah ditetapkan demi keselamatan manusia, makhluk hidup dan benda lainnya serta keamanan operasi SUTT, SUTET, dan SUTTAS. Sedangkan jarak bebas minimum horizontal dari sumbu vertikal menara/tiang adalah jarak terpendek secara horizontal dari sumbu vertikal menara/tiang ke bidang vertikal ruang bebas bidang vertikal tersebut sejajar dengan sumbu vertikal menara/tiang dan konduktor (Kementrian ESDM, 2015).

Besarnya andongan konduktor menjadi sangat penting untuk diperhatikan dalam pengoperasian sistem transmisi. Dengan adanya peraturan menteri ESDM nomor 18 tahun 2015, besarnya andongan maksimal yang diperbolehkan diatur sesuai dengan kondisi geografis dari saluran transmisi tersebut. Maka dari itu besar andongan harus diperhatikan dan dibatasi demi menjaga keselamatan manusia, makhluk hidup dan benda lainnya serta keamanan operasi.



Gambar 3.4 Penampang memanjang memajang ruang bebas

Tabel 3.1 Jarak aman pada tiang Transmisi

NO	Lokasi	SUTT	
		66 kV (m)	150 kV (m)
1	Lapangan terbuka atau daerah terbuka (a)	7,5	8,5
2	Daerah dengan keadaan tertentu <ul style="list-style-type: none"> • Bangunan, jembatan (b) • Tanaman, hutan, perkebunan (b) • Jalan/jalan raya/rel kereta api (a) • Lapangan umum (a) • SUTT lain, saluran udara tegangan rendah (SUTR), saluran udara tegangan menengah (SUTM), saluran udara komunikasi, dan antena. (b) 	4,5 4,5 8,0 12,5 3,0	5,0 5,0 9,0 13,5 4,0

CATATAN:

- a) Jarak bebas minimum vertikal dihitung dari konduktor ke permukaan bumi atau permukaan jalan
- b) Jarak bebas minimum vertikal dihitung dari konduktor ke titik tertinggi / terdekatnya

3.4 Temperatur Konduktor Akibat Perubahan Arus Saluran

Besarnya arus yang mengalir pada konduktor menyebabkan timbulnya rugi-rugi berupa panas. Hal ini menyebabkan suhu dari konduktor akan meningkat seiring dengan kenaikan arus beban pada konduktor tersebut. Untuk menghitung besarnya panas konduktor akibat dari kenaikan arus beban ini digunakan persamaan keseimbangan panas pada saluran transmisi udara yang menyatakan bahwa jumlah panas yang yang dibangkitkan dalam konduktor adalah sama dengan jumlah panas yang disebarkan. Oleh karena itu perlu dicari besarnya jumlah panas dari kedua ruas persamaan.

3.4.1 Panas Yang Dibangkitkan Oleh Konduktor

3.4.1.1 Panas oleh faktor arus saluran

Ukuran panas konduktor saluran tergantung dari besarnya arus dan resistansi pada temperatur konduktor yang berlaku. Besar resistansi saluran akibat perubahan suhu dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$W_c = I^2 R_m \text{ (Watt/meter)} \dots\dots\dots(3.5)$$

dengan:

I = arus penghantar (A)

R_m = hambatan dari konduktor pada temperatur

$$\text{maksimal (/meter)} = \frac{1+t}{1+20\alpha} R_{20}$$

3.4.1.2 Panas oleh faktor radiasi matahari

Penyerapan panas dari matahari terhadap konduktor sebesar:

$$WS = \alpha \cdot E \cdot dc \text{ (W/m)} \dots\dots\dots(3.6)$$

dengan:

= koefisien serap matahari

= 1, untuk benda hitam;

= 0.6, untuk konduktor

E = intensitas radiasi matahari (1000 ~1500 W/m²)

dc = diameter konduktor (m)

3.4.1.3 Pendinginan oleh faktor radiasi

Konduktor transmisi memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Emisivitas dari sebuah bahan merupakan pecahan dari pemancaran energi dan energi sebuah benda hitam yang telah terpancar pada temperatur yang sama. Emisivitas dari konduktor meningkan dengan umur dari konduktor tersebut. kenyataan yang dikaji dalam konduktor ACSR telah menunjukkan konduktor yang baru dipasang dapat memiliki emisivitas 0.23 sedangkan konduktor yang telah lama dapat memiliki emisivitas sebesar 0.95. Total pendinginan radiasi dapat dapat diuraikan dengan:

$$Wr = 17,9 \varepsilon \left(\frac{Tc}{100} \right)^4 - \left(\frac{Ta}{100} \right)^4 dc \text{ (W/m)} \dots\dots\dots(3.7)$$

dengan:

j = emisivitas

T_c = temperatur konduktor ($^{\circ}K$)
 $= 273 + t$

T_a = temperatur sekeliling ($^{\circ}K$)
 $= 273 + t_a$

3.4.1.4 Pendinginan oleh faktor reaksi konveksi

Sebagai sebuah konduktor penghantar faktor arus dan panas matahari lebih panas daripada udara sekitar dan konduktor tersebut akan memanaskan udara yang dekat pada bagian permukaan. Jika ada angin, udara yang terpanaskan tadi dibawa oleh udara dingin (angin yang baru) menjauh dari permukaan konduktor. Ketika panas meninggalkan konduktor, hal inilah yang dikatakan sebuah proses pendinginan pada konduktor. Ada beberapa persamaan yang dapat digunakan dalam perhitungan kasus ini, untuk mempermudah dalam perhitungan pada analisa kasus ini dalam penelitian yang dilakukan ialah menggunakan persamaan berikut:

$$W_k = 5.73 \sqrt{p \cdot V_m / d_c} \cdot \Delta t (W/m^2) \dots\dots\dots(3.8)$$

dengan:

p = tekanan udara (atmosfir)
 $=$ Tekanan udara normal: 1 atm

V_m = kecepatan angin (m/detik)

= kecepatan angin 0,25 m/s

t = kenaikan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

= $t - t_a$

Apabila panjang konduktor memiliki luas $.dc \text{ m}^2$, maka :

$$Wk = 18. \Delta t. \overline{p.Vm.dc} (W/m) \dots\dots\dots(3.9)$$

3.4.2 Persamaan Keseimbangan Panas

Temperature konduktor pada saluran udara dengan konstan berubah seiring perubahan arus saluran dan kondisi cuaca. Perubahan temperatur konduktor dalam interval waktu (τ) dapat dihitung menggunakan persamaan keseimbangan panas non-steady-state menurut standar IEEE no.738 tahun 2012.

$$Wr + Wk + mc\Delta T = Wc + Ws \dots\dots\dots(3.10)$$

Maka , dari persamaan di atas dapat diperoleh jumlah panas pada saluran akibat proses pemanasan dan pendinginan yang terjadi:

$$mc\Delta T = Wc + Ws - Wr - Wk \dots\dots\dots(3.11)$$

Dimana,

Wc = Panas saluran yang diakibatkan arus saluran (W/m)

W_s = Panas saluran yang diakibatkan penyerapan panas matahari (W/m)

W_r = Panas saluran yang diakibatkan radiasi (W/m)

W_k = Panas saluran yang diakibatkan konveksi (W/m)

m massa per unit panjang dan c kalor jenis dinyatakan dengan kapasitas panas konduktor yang diperoleh dengan persamaan :

$$mc = m_a c_a + m_s c_s \dots\dots\dots(3.12)$$

Dimana,

m_a = massa per unit panjang aluminium (kg/m)

m_s = massa per unit panjang baja (kg/m)

c_a = Kalor jenis aluminium (J/kg °C)

c_s = Kalor jenis baja (J/kg °C)

Tabel 3.2 Kalor Jenis benda (Pada tekanan 1 atm dan suhu 20 °C)

Jenis Benda	Kalor Jenis (c)	
	J/kg C°	kcal/kg C°
Air	4180	1,00

Alkohol (ethyl)	2400	0,57
Es	2100	0,50
Kayu	1700	0,40
Aluminium	900	0,22
Marmmer	860	0,20
Kaca	840	0,20
Besi / baja	450	0,11
Tembaga	390	0,093
Perak	230	0,056
Raksa	140	0,034
Timah hitam	130	0,031
Emas	126	0,030

3.5 Kuat Tarik dan Andongan Konduktor

Kuat tarik horizontal konduktor dapat diketahui dari persamaan (3.13) dibawah ini:

$$(f_2)^2 \{f_1 - [K - (\alpha x t x E)]\} = M \dots \dots \dots (3.13)$$

$$K = f_1 - \frac{\delta^2 x q_1^2 x s^2 x E}{24 x J_2^2} \dots \dots \dots (3.14)$$

$$M = \frac{\delta^2 \times q_1^2 \times s^2 \times E}{24} \dots\dots\dots(3.15)$$

$$\delta = \frac{W}{A} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$q_1 = \frac{W_a}{W} \dots\dots\dots(3.17)$$

$$f_1 = \frac{T}{A} \dots\dots\dots(3.18)$$

dengan:

W = berat dari konduktor (kg/m).

A = Luas penampang konduktor (mm²).

W_a = berat akhir dari konduktor (kg/m).

T = tegangan atau tension (Kg).

s = jarak antar menara (m).

E = Modulus elastis (kg/mm²).

f_2 = Tegangan tarik terhadap andongan [kg/mm²]

t = Suhu maksimum pada andongan tertentu [/°C]

a = Koefisien permulaan linier [/°C]

K = Koefisien tegangan tarik [kg/mm²]

M = Tegangan tarik kawat [kg/mm²]

f_1 = Tegangan kerja kawat penghantar [kg/mm²]

q_1 = ketegangan kerja maksimum kawat (kg/m).

Selanjutnya dapat dihitung kuat tarik konduktor sebagai berikut:

3.5.1 Menara yang sama tingginya.

Untuk mencari perhitungan andongan dan tegangan tarik dari 2 menara transmisi yang sama tingginya adalah sebagai berikut :

$$T = f_2 \times A \dots\dots\dots(3.19)$$

$$d = \frac{Wxs^2}{8T} \dots\dots\dots(3.20)$$

$$L = s \left[1 + \frac{1}{24} \frac{Wxs^2}{T} \right] \dots\dots\dots(3.21)$$

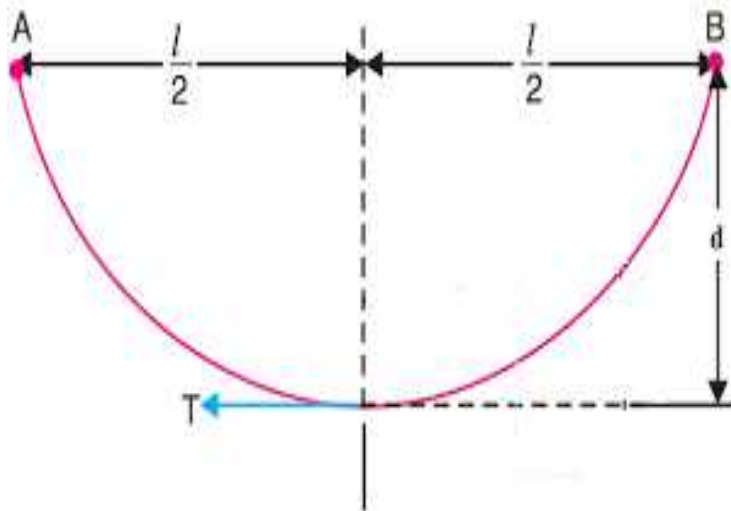
$$T_{AB} = T \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{Wxs}{T} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(3.22)$$

dengan:

d = andongan (m).

L = panjang konduktor (m).

T_{AB} = kuat tarik horisontal (Kg).



Gambar 3.5 Menara sama tinggi

Keterangan :

- A & B = Tiang Menara
- T = Kuat tarik (tension)
- d = Andongan
- l = Panjang gawang

3.5.2 Menara yang beda tingginya

Untuk mencari perhitungan andongan dan tegangan tarik dari 2 menara transmisi yang tidak sama tingginya adalah sebagai berikut:

$$T = f_2 \times A \dots\dots\dots(3.23)$$

$$d = \frac{wxs^2}{8T} \dots\dots\dots(3.24)$$

$$d_A = d \left(\frac{h}{4d} - 1 \right)^2 \dots\dots\dots(3.25)$$

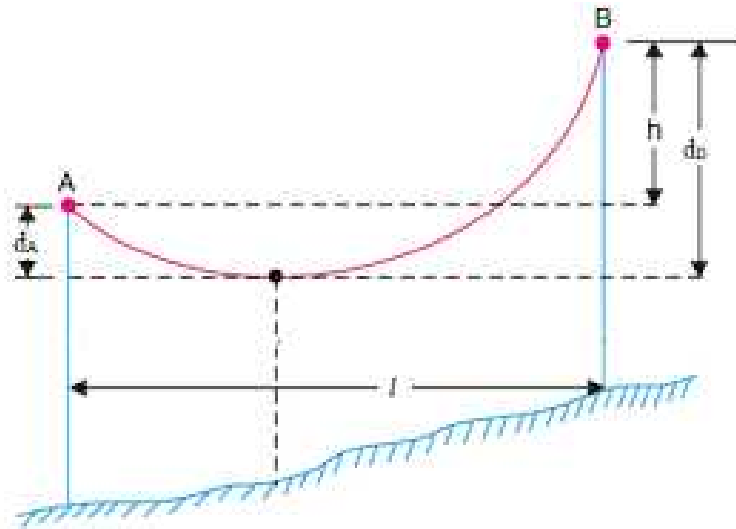
$$d_B = d \left(\frac{h}{4d} + 1 \right)^2 \dots\dots\dots(3.26)$$

$$L = s \left[1 + \frac{1}{24} \left(\frac{Wxs^2}{T} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{s} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(3.27)$$

$$T_{AB} = T + (W \times d_{AB}) \dots\dots\dots(3.28)$$

$$T_A = T + (W \times d_A) \dots\dots\dots(3.29)$$

$$T_B = T + (W \times d_B) \dots\dots\dots(3.30)$$



Gambar 3.6 Menara yang Tidak Sama Tinggi

Keterangan :

- $A \ \& \ B =$ Tiang Menara
- $h =$ Selisih tinggi menara A ke menara B
- $d_A =$ Andongan tiang A
- $d_B =$ Andongan tiang B
- $l =$ Panjang gawang

3.5.3 Metoda Span Equivalen

Metode rulling span diperkenalkan pertama kali oleh Thayer (1924), adalah berguna untuk menghitung andongan dan tegangan tarik pada struktur dua dead end yang terdiri atas multi span yang berjarak tak sama. Jika ada n span dengan panjang $L_1, L_2, L_3, L_4, \dots, L_n$ pada setiap bagian dan L_e adalah ekuivalen

span atau dinamakan rulling span pada setiap bagian. Panjang total dari jarak antar menara adalah : $L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + \dots + L_n$

Maka untuk n jarak antar menara dapat diasumsikan :

$$nL_e = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + \dots + L_n = \sum_{i=0}^n L$$

sehingga jika panjang kawat dalam kondisi berbeban w dan tegangan tarik T_0 dirumuskan :

$$\sum L + \frac{w^2 \sum L^3}{24T_0}$$

Panjang kawat pada n span dengan panjang masing-masing L_e , dibawah kondisi beban sama :

$$n L_e + \frac{w^2 L_e^3}{24T_0^2}$$

Tetapi ini adalah panjang kawat pada setiap bagian saluran. Sehingga persamaan :

$$\sum L + \frac{w^2 \sum L^3}{24T_0} = n L_e + \frac{w^2 L_e^3}{24T_0}$$

$$\sum L^3 = n L_e^3$$

$$L_e^2 = \frac{\sum L^3}{n L_e} = \frac{\sum L^3}{\sum L}$$

$$L_e = \sqrt{\left(\frac{L_1^3 + L_2^3 + L_3^3 + \dots + L_n^3}{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n} \right)} \dots\dots\dots(3.31)$$

dengan:

L_n = panjang span ke- n

L_e = panjang span equivalen

persamaan diatas dinamakan persamaan rulling span.