



TUGAS AKHIR - EE 184801
PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI
KAYAN *HYDROPOWER* KE *GRID* KALIMANTAN

Redi Permata Hati
NRP 07111745000019

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara.,ST.,M.Sc.
Dr.Ir. Soedibyو, M.MT.

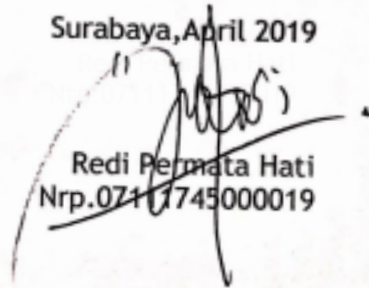
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

**PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “Perencanaan Dan Desain Saluran Transmisi Kayan *Hydropower* ke *Grid* Kalimantan” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, April 2019


Redi Permata Hati
Nrp.0711745000019

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

**PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI KAYAN
HYDROPOWER KE GRID KALIMANTAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga

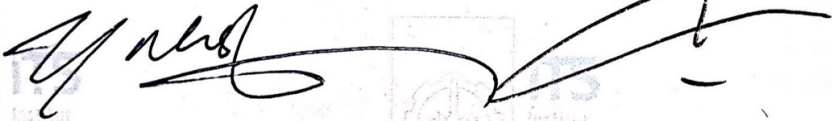
Departemen Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Meayetujui :

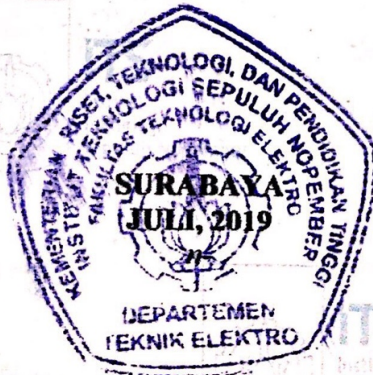
Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,



Dr.Eng.I Made Yulistya Negara,ST.,M.Sc
NIP. 197007121998021001

Dr.Ir.Soedibyo, M.MT.
NIP. 195512071980031004



---Halaman ini sengaja dikosongkan---

PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI KAYAN *HYDROPOWER KE GRID KALIMANTAN*

Nama : Redi Permata Hati
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya N., S.T., M.Sc.
Pembimbing II : Dr.Ir.Soedibyo, M.MT.

ABSTRAK

Energi listrik sangat penting peranannya dalam kehidupan manusia. Pertumbuhan penduduk yang sangat pesat diiringi dengan konsumsi energi listrik yang meningkat. Oleh karena itu perlu langkah semaksimal mungkin untuk memenuhi hal tersebut. Salah satu langkah yang dilakukan yaitu merencanakan saluran transmisi dari pembangkit agar energi listrik dapat tersalurkan secara maksimal. Pada penelitian ini dibahas tentang perencanaan saluran transmisi udara tegangan tinggi dari Kayan *Hydropower* menuju *Grid* Kalimantan (Long Apari) 900 MW dengan panjang saluran 110 kms mulai dari pemilihan rute saluran hingga desain saluran transmisi. Dari penelitian ini diperoleh dasar peralatan penyaluran melalui jaringan udara transmisi. Saluran udara transmisi tersebut menggunakan tegangan 150 kV terdiri dari 509 menara transmisi dengan jarak antar menara rata - rata 300 m. Konduktor yang digunakan adalah konduktor ACSR 45/7 650 mm² diameter 3,44 cm (r=1,702 cm) 2 *bundle* konduktor dengan susunan 45AL / 7St , andongan yang dihasilkan 1,25 m untuk keadaan menara dengan ketinggian sama. Sedangkan total *losses* sepanjang saluran sebesar 1369,5 kW. Perencanaan saluran transmisi ini dimodelkan dalam bentuk desain visual menggunakan *software PLS Cadd*.

Kata Kunci : Perencanaan Saluran Transmisi 150 kV, *Sagging*, Andongan, *PLS-Cadd*.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

PLANNING AND DESIGN OF KAYAN HYDROPOWER TRANSMISSION LINES TO KALIMANTAN GRID

Nama : Redi Permata Hati
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya N., S.T., M.Sc.
Pembimbing II : Dr.Ir.Soedibyo, M.MT.

ABSTRACT

Electrical energy is very important in human life. Very rapid growth is accompanied by increased electricity consumption. therefore it is necessary to take the maximum steps to fulfill this. one of the things that can be done is to plan the transmission line from the generator so that the electrical energy channeled can be maximized. In this study discussed the planning of high voltage air transmission lines from Kayan Hydropower to Grid 900 MW Kalimantan (Long Apari) with a transmission line length of 110 kms. From this study the basic distribution equipment is obtained through transmission overhead lines. The transmission overhead line uses a voltage of 150 kV consisting of 509 transmission towers with an average distance of 300 m. The conductor used is a type of ACSR 45/7 650 mm² with a diameter of 3.44 cm (r = 1.702 cm) 2 conductor bundles with a 45Al / 7St arrangement, The sagging is produced 1.25 m for tower conditions with the same height. While the total losses along the channel amounted to 1369.5 kW. This transmission line planning is modeled in the form of visual design using PLS Cadd software

Keywords: Planning Transmission line 150 kV, *Sagging*, Andongan, PLS-Cadd.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil 'alamin, puji syukur saya panjatkan kehadiran Allah SWT, karena hanya dengan berkat dan rahmatnya-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “Perencanaan dan Desain Saluran transmisi Kayan *Hydropower* ke *Grid* Kalimantan”. Tugas Akhir disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Program Studi Teknik Sistem Tenaga Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya..

Dalam menyusun Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan yang bersifat moral maupun spiritual, secara langsung maupun tidak langsung dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT, karena atas izin-Nya lah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Serta Nabi Muhammad SAW sebagai inspirator dan tuntunan penulis.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan, nasehat, serta doa-doanya.
3. Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc., dan Bapak Dr.Ir.Soedibyo, M.MT. selaku dosen pembimbing, atas segala ilmu dan waktu yang telah diberikan untuk membimbing penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
4. Partner sesama TA perencanaan dan desain saluran transmisi, Naufal Hilmi Utomo.
5. Mas Arief, teman-teman perkuliahan, dan pihak-pihak lainnya yang membantu pengerjaan TA ini yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, penulis berharap Tugas Akhir ini dapat menambah pengetahuan dan bermanfaat bagi siapapun yang membaca.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
HALAMAN PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi atau Manfaat	4
BAB 2 JARINGAN TRANSMISI TENAGA LISTRIK	5
2.1 Perencanaan Saluran Transmisi	5
2.2 Pertimbangan Sisi Perencanaan Sistem Jaringan	5
2.3 Konfigurasi Saluran Transmisi.....	6
2.4 Pemilihan Tegangan.....	7
2.5 Komponen Utama Saluran Transmisi	8
2.6 Pemilihan Jenis Konduktor	13
2.7 Perencanaan Isolasi Saluran Transmisi	19

2.8	Perencanaan <i>Outline</i> Menara	23
2.9	Pentanahan Kaki Menara	26
2.10	Korona Pada Saluran Transmisi	28
2.11	Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi.....	31
2.12	Penangkapan Kilat oleh Saluran Transmisi.....	31
2.13	Jumlah Sambaran Kilat Ke Bumi, dan Busur Api.....	32
2.14	Radius Efektif Kawat Tanah ,Kawat Fasa dengan Korona ..	34
2.15	Impedansi Surja Kawat dan Impedansi Surja Menara.....	36
BAB 3	PERENCANAAN SALURAN TRANSMISI KAYAN HYDROPOWER KE GRID KALIMANTAN.....	43
3.1	Rencana Jalur SUTT 150kV Kayan- <i>Grid</i> Kalimantan.....	43
3.2	Rencana Jalur SUTT 150kV <i>Kayan Hydropower-Apari</i>	45
3.3	Kondisi Geografis Daerah Saluran Transmisi	45
3.4	Perencanaan Perlengkapan SUTT	47
3.5	Rencana Pemilihan Konduktor.....	47
3.6	Rencana Pemilihan Menara.....	51
3.7	Rencana Pemilihan Isolator.....	55
3.8	Rencana Kawat Pentanahan	61
BAB 4	PERENCANAAN SALURAN TRANSMISI KAYAN HYDROPOWER KE LONG APARI.....	65
4.1	Konfigurasi Saluran Transmisi.....	65
4.2	Ukuran dan Tipe Konduktor Transmisi 150 kV	65
4.3	Menentukan Andongan (<i>Sag</i>).....	67
4.4	Penentuan Jarak Bebas Konduktor Jaringan SUTT	70
4.5	Perhitungan Spasi Antar Sub <i>Bundle</i> Konduktor	72
4.6	Perhitungan Jari-jari Ekuivalen <i>Bundle</i> Konduktor (GMR)...	75
4.7	Perhitungan GMD	76
4.8	Perhitungan Resistansi <i>Bundle</i> Konduktor.....	76

4.9	Rugi Daya Saluran Transmisi	77
4.10	Gradien Tegangan Permukaan Konduktor Maksimum	77
4.11	Tegangan Disruptive Kritis	79
4.12	Rugi Daya Korona	80
4.13	Perencanaan Konduktor SUTT 150 kV	81
4.14	Perhitungan Tegangan <i>Flashover</i> dan Surja <i>Switching</i>	83
4.15	Perencanaan Isolator Saluran transmisi 150 kV	88
4.16	Penentuan Outline Menara SUTT 150 kV	88
4.17	Pentanahan Kaki Menara	92
4.18	Hitungan untuk Kegagalan Perisaian SUTT 150 kV	96
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	101
5.1	Kesimpulan	101
5.2	Saran	101
	DAFTAR PUSTAKA	103
	LAMPIRAN.....	105

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konfigurasi Rangkaian Tunggal.....	6
Gambar 2.2 Konfigurasi Rangkaian Ganda	7
Gambar 2.3 Isolator Tonggak Saluran Vertikal	10
Gambar 2.4 Aliran Arus Pada Penampang Konduktor	10
Gambar 2.5 Konfigurasi Kawat Berkas	14
Gambar 2.6 <i>Geometrik Mean Radius (GMR)</i>	16
Gambar 2.7 Perhitungan GMD untuk Sirkuit Vertikal Ganda	17
Gambar 2.8 Andongan dan <i>Ground Clearance</i>	25
Gambar 2.9 Lebar Jalur Perisai Terhadap Sambaran Kilat	31
Gambar 2.10 Perisaian Tidak Sempurna.....	39
Gambar 2.11 Perisaian Sempurna	41
Gambar 2.12 Cara Menentukan Harga Yo Untuk Memperoleh Smax..	41
Gambar 3.1 Jalur Utara	43
Gambar 3.2 Jalur Selatan	44
Gambar 3.3 Jalur Ring	44
Gambar 3.4 Rencana Rute Saluran Kayan-Long Apari	45
Gambar 3.5 Insulator tipe <i>I String</i>	56
Gambar 3.6 Insulator tipe <i>V String</i>	57
Gambar 3.7 Insulator tipe <i>Horizontal string</i>	57
Gambar 3.8 Insulator tipe <i>Single String</i>	57
Gambar 3.9 Insulator tipe <i>Double String</i>	58
Gambar 3.10 Insulator tipe <i>Quadruple</i>	58
Gambar 3.11 Tension Clamp	59
Gambar 3.12 Sambungan Penghantar	60
Gambar 3.13 Spacer.....	61
Gambar 3.14 Pemasangan Pelindung Kawat Transmisi.....	61
Gambar 3.15 Penyambungan pada bagian bawah Stub.....	64
Gambar 3.16 Penyambungan pada bagian atas Stub.....	64
Gambar 4.1 Andongan dengan Tinggi Menara yang Sama	68
Gambar 4.2 Jarak Bebas Konduktor	72
Gambar 4.3 Jarak antara Konduktor Satu <i>Bundle</i> dalam Satu Fasa	75
Gambar 4.4 Konfigurasi Konduktor Hasil Perhitungan	82
Gambar 4.5 Ruang Bebas Minimum.....	82
Gambar 4.6 Gambar Menara Suspension type AA	89
Gambar 4.7 Menara Tension Transmisi tipe DD	90
Gambar 4.8 Desain Saluran Transmisi 150 kV	92
Gambar 4.10 Rencana Daerah Perlindungan Kawat Tanah	96

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Korelasi Tegangan Standar Terhadap Koefisien Kapasitas	8
Tabel 2.2 Karakteristik Bahan Konduktor Tembaga dan Aluminium...	11
Tabel 2.3 Tingkat Kontaminasi	20
Tabel 2.4 Standar Span	24
Tabel 2.5 Faktor Permukaan Korona	29
Tabel 2.6 Fungsi Rugi Daya.....	30
Tabel 2.7 Relasi Antara Kerapatan Sambaran Kilat dan Hari Guruh....	33
Tabel 3.1 Kondisi Geografis Daerah Saluran Transmisi	47
Tabel 3.2 Tipe dan Fungsi Menara Menara SUTT 150 kV	52
Tabel 3.3 Jenis Tanah untuk Pondasi	53
Tabel 3.4 Tipe Pondasi.....	53
Tabel 3.5 Volume Pondasi	54
Tabel 3.6 Karakteristik Bahan Siku Menara	54
Tabel 3.7 Karakteristik Bahan Baut Manara SUTT	55
Tabel 3.8 Resistansi Jenis Tanah	63
Tabel 4.1 Ukuran dan KHA Kawat Penghantar ACSR.....	66
Tabel 4.2 Standar Span Saluran Transmisi	67
Tabel 4.3 Perencanaan Pemilihan Konduktor	81
Tabel 4.4 Tingkat Kontaminasi	85
Tabel 4.5 Kondisi Cuaca (Hu)	85
Tabel 4.6 Rekomendasi Jumlah Isolasi SUTT 150 kV	86
Tabel 4.7 Data Isolator Menurut Standart SPLN	87
Tabel 4.8 Perencanaan Isolator Saluran Transmisi 150 kV	88
Tabel 4.9 Ukuran Standar Menara Transmisi	90
Tabel 4.10 Berat Menara Standar dan Perubahannya	91

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Berdasarkan data kementerian ESDM tahun 2017 rata-rata rasio elektrifikasi di Kalimantan kurang dari 90%, hal ini tidak sebanding dengan angka pertumbuhan beban, Oleh karena itu PLN sebagai penyedia energi listrik semaksimal mungkin untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Salah satu langkah yang dilakukan yaitu interkoneksi Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara. Salah satu pembangkit yang saat ini sudah direncanakan pembangunannya untuk wilayah Kalimantan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di sungai Kayan yang berkapasitas 850 MW sampai 1700 MW. Sehingga akan dibangun saluran transmisi (SUTT) 150 kV sepanjang 110 km dari Kayan *Hydropower* ke *grid* Kalimantan yang direncanakan pada penelitian tugas akhir ini.

Saluran transmisi yang akan dibangun adalah jenis saluran transmisi saluran udara atau *overhead line*. Saluran transmisi udara ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan saluran transmisi bawah tanah atau *underground line*. Saluran transmisi udara akan lebih mudah untuk melayani pertumbuhan beban atau pengembangan sistem dari pada saluran transmisi bawah tanah, serta dari segi ekonomis pembangunan saluran transmisi bawah tanah mengeluarkan biaya yang sangat besar. [1]

Pembangunan saluran transmisi udara menyangkut dua aspek utama yaitu segi teknis dan segi ekonomis. Secara teknis hal-hal yang diperhatikan berkaitan dengan pemilihan jenis dan ukuran penghantar, penentuan isolator, perhitungan andongan, ukuran menara dan lain-lain. Disamping secara teknis, perencanaan tersebut harus dapat pula di terima secara ekonomis.

Pada penelitian ini penulis menggunakan metode penentuan andongan dengan mengasumsikan kuat tarik dari penghantar konstan terhadap perubahan jarak antar menara dan panjang kawat konstan terhadap perubahan temperatur yang terjadi. Perencanaan saluran transmisi ini akan dimodelkan dalam bentuk desain visual menggunakan *software PLS Cadd*.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana menyalurkan daya listrik dari Kayan *Hydropower* ke grid Kalimantan?
2. Bagaimana menentukan peralatan saluran udara tegangan tinggi 150 kV?
3. Bagaimana menentukan *sagging* pada ketiga kawat fasa dan kawat tanah?
4. Bagaimana menentukan sistem pentanahan dari *Overhead Ground Wire* dan pentanahan menara transmisi?

1.3 Batasan Masalah

Dalam tugas akhir ini permasalahan akan dibatasi pada perencanaan peralatan saluran udara tegangan tinggi yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik dari Kayan *Hydropower* ke Grid Kalimantan (Long Apari) menggunakan tegangan 150 kV dan perhitungan sistem pentanahan dari *Ground Wire* untuk melindungi kawat penghantar dari sambaran petir dan pentanahan kaki- kaki menara transmisi.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mendapatkan perhitungan dan pemilihan peralatan saluran transmisi 150 kV yang sesuai secara teknis sehingga dapat digunakan sebagai acuan perencanaan dan desain saluran transmisi 150 kV Kayan *Hidropower* ke Grid Kalimantan.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam tugas akhir ini terdiri dari Studi Literatur, Pengadaan Journal Ilmiah, Pengadaan Proceeding, dan Pengadaan Text Book, Pengumpulan Data, Analisis Hasil Data, dan Pemodelan Sistem.

1. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan judul tugas akhir seperti studi tentang peralatan yang digunakan pada saluran transmisi, analisa perhitungan *sagging*, dan faktor yang menjadi pertimbangan dalam desain dan perencanaan saluran transmisi.

2. Pengadaan *Journal*

Paper-paper yang diterbitkan oleh suatu badan organisasi dalam bentuk majalah. Paper-paper yang diambil adalah yang

berhubungan dengan rumus dasar perhitungan mengenai menara transmisi, konduktor, isolator dan *sagging*. Contoh *journal* yang dipakai *journal IEEE*

3. Pengadaan *Proceeding Journal* atau *paper-paper* yang dibutuhkan adalah paper-paper yang diterbitkan disuatu seminar dalam bentuk e-paper, diunduh melalui web IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) yang berhubungan dengan rumus dasar perhitungan mengenai menara transmisi, konduktor, isolator dan *sagging*.
4. Pengadaan Text Book
Text book yang dibutuhkan adalah materi-materi yang berhubungan dengan rumus dasar perhitungan mengenai menara transmisi, konduktor, isolator, *sagging*. dan cara penulisan karya ilmiah untuk refensi penyusunan buku tugas akhir.
5. Pengumpulan Data
Data yang diperlukan untuk melakukan perencanaan saluran transmisi diantaranya yaitu jarak untuk menentukan panjang konduktor, daya yang akan di salurkan.dll
6. Analisis hasil data
Dengan melakukan analisis hasil data kemudian dapat ditentukan perhitungan mengenai jumlah dan menara transmisi , panjang konduktor, jenis konduktor dan pentanahannya, jumlah isolator, perhitungan *sagging*.
7. Permodelan system
Perencanaan saluran transmisi ini akan dimodelkan dalam bentuk desain visual menggunakan *software PLS Cadd*.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan dalam melakukan pembahasan dari isi laporan peneliti ini, maka pembahasan dibagi menjadi lima bab yang terdiri dari :

- Bab 1 : Pendahuluan
Pada bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
- Bab 2 : Teori Dasar

Pada bab ini berisi teori-teori dasar tentang pembahasan materi yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, sehingga pembahasan laporan ini bisa dipertanggung jawabkan.

Bab 3 : Data Penunjang

Bab ketiga adalah tentang pemilihan jalur yang akan digunakan untuk lewatnya saluran transmisi, serta data penunjang yang akan digunakan sebagai dasar perencanaan saluran transmisi 150 kV dari *Kayan hydropower* sampai Long Apari.

Bab 4 : Perencanaan Saluran Transmisi 150 kV

Pada bab yang keempat berisi tentang proses pemilihan peralatan yang digunakan untuk pembuatan saluran transmisi 150 kV dari *Kayan Hydropower* sampai Long Apari.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran sehubungan dengan penulisan laporan Tugas Akhir ini.

1.7 Relevansi atau Manfaat

Dengan dilakukan penelitian tentang hal – hal teknis, yang perlu dilakukan dalam perencanaan peralatan tegangan tinggi pada saluran transmisi 150 kV *Kayan Hydropower* ke Grid Kalimantan maka diharapkan penelitian ini dapat dijadikan bahan pertimbangan atau referensi sehingga dalam 2 proses pengerjaan perencanaan peralatan tegangan tinggi yang baru dapat lebih mudah.

BAB 2

JARINGAN TRANSMISI TENAGA LISTRIK

2.1 Perencanaan Saluran Transmisi

Perencanaan saluran transmisi meliputi beberapa tahap yang sangat terkait antara satu tahapan dengan tahapan lainnya. Di antaranya adalah penentuan tegangan, pemilihan jenis kawat konduktor, perhitungan nilai andongan, penentuan jarak minimum antar kawat konduktor, serta clearance pada saluran.

Ada dua kategori saluran transmisi (*overhead lines*) dan saluran kabel tanah (*underground cable*). Yang pertama menyalurkan tenaga listrik melalui kawat - kawat yang digantung pada menara atau tiang transmisi dengan perantaraan isolator - isolator, sedang kategori yang kedua menyalurkan tenaga listrik melalui kabel - kabel yang ditanam dibawah permukaan tanah. Keduanya mempunyai keuntungan dan kerugian sendiri - sendiri, dibandingkan saluran udara, saluran bawah tanah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, hujan angin, bahaya petir dan sebagainya.[1]

Saluran bawah tanah dinilai lebih estetik karena tidak mengganggu pemandangan. Karena alasan terakhir, saluran bawah tanah lebih disukai, terutama untuk daerah yang padat penduduknya dan di kota - kota besar. Namun biaya pembangunannya jauh lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara, dan perbaikannya jauh lebih sukar bila terjadi gangguan hubung singkat dan kesukaran - kesukaran lain.

Pembangunan saluran transmisi udara menyangkut dua aspek utama yaitu segi teknis dan segi ekonomis. Secara teknis hal-hal yang diperhatikan berkaitan dengan pemilihan jenis dan ukuran penghantar, penentuan isolator, perhitungan andongan, ukuran menara dan lain-lain. Disamping secara teknis, perencanaan tersebut harus dapat pula di terima secara ekonomis.

2.2 Pertimbangan Sisi Perencanaan Sistem Jaringan

Dalam merencanakan jalur transmisi dibutuhkan beberapa pertimbangan dari aspek sistem jaringan SUTT diwilayah tertentu menjadi salah satu aspek yang harus diperhatikan sehingga dalam pengoprasiannya dapat optimal.

Dalam merencanakan jalur SUTT perlu memperhatikan beberapa faktor dibawah ini, sehingga dalam pelaksanaan tidak banyak mengalami gangguan maupun kesulitan dalam pemeliharaan, antara lain ;

- a. Pemilihan rute yang telah memnperhitungkan beberapa aspek yaitu: teknis ekonomis lingkungan dan estetika.
- b. Berdasarkan referensi titik lokasi Gardu Induk yang telah ditentukan pada jaringan *existing*.
- c. Rencana kapasitas maksimum penyaluran daya.
- d. Mengutamakan penempatan menara sudut yang memiliki akses jalan, tidak mempunyai beda elevasi yang ekstrim antara titik-titik kaki menara (di lereng), tidak di lokasi rawa.
- e. Kemudahan jalur untuk dapat di jangkau oleh petugas operasional

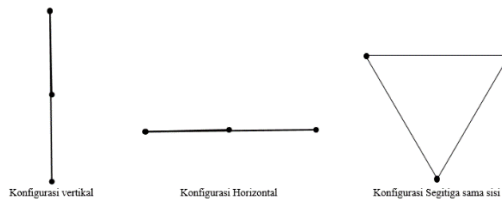
2.3 Konfigurasi Saluran Transmisi

Konfigurasi saluran transmisi dapat dibagi menjadi dua,yaitu :

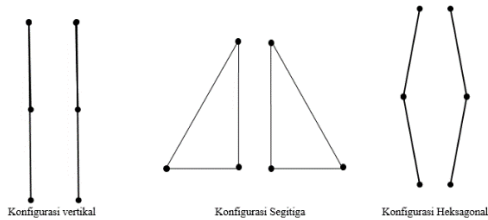
- a. Rangkaian tunggal
- b. Rangkaian ganda

Pada saluran transmisi rangkaian tunggal terdapat beberapa konfigurasi yaitu : konfigurasi horizontal, vertikal dan konfigurasi segitiga sama sisi. Pada konfigurasi horizontal, ketika fasa berada pada ketinggian yang sama dengan jarak pemisah antar konduktor yang sama besarnya. Pada konvigurasi vertikal, ketiga kawat fasa tersusun secara vertikal dengan jarak pemisah antar konduktor sama besarnya.Pada konfigurasi sama sisi susunan fasanya berbentuk segitiga sama sisi. Sehingga jarak antar fasanya sama besar seperti dapat dilihat pada gambar 2.1. [2]

Pada saluran transmisi rangkaian ganda terdapat beberapa konfigurasi yaitu : konfigurasi vertikal, konfigurasi sama sisi, dan konfigurasi heksagonal. Urutan fasa pada konfigurasi rangkaian ganda secara umum berkebalikan antara sisi penyalur satu dengan sisi penyalur yang lain.



Gambar 2.1 Konfigurasi Rangkaian Tunggal



Gambar 2.2 Konfigurasi Rangkaian Ganda

2.4 Pemilihan Tegangan

Dalam pemilihan tegangan saluran transmisi ada beberapa faktor yang sangat mempengaruhi antara lain jarak saluran transmisi dan besar daya maksimum yang disalurkan. Dalam memilih tegangan harus diarahkan supaya didapatkan tegangan yang ekonomis, tetapi untuk menetapkan tegangan yang paling ekonomis sesungguhnya diperlukan studi perbandingan terhadap berbagai biaya masing-masing alternatif tegangan yang akan digunakan. Disamping itu ada beberapa dasar pemilihan tegangan yang ekonomis yang telah ditentukan oleh para ahli secara empiris antara lain [3]

Menurut Alfred Still

$$V = 5,5 \sqrt{d + KVA / 150}$$

Dimana : V = Tegangan line-line (kV)
 d = Jarak saluran transmisi (mile)
 KVA = Daya maksimum yang disalurkan

Menurut Mett Hammer

$$V = 0,30 \sqrt{Pb + 0,50d}$$

Dimana : Pb = daya disisi terima (KVA)
 d = jarak saluran transmisi (km)

Rumus menurut Alfred Still hanya berlaku untuk jarak lebih dari 20 mile.

Apabila tegangan yang digunakan pada saluran transmisi bertambah besar (makin tinggi) maka akan mempengaruhi terhadap: berat konduktor yang diperlukan, kerugian daya saluran, efisiensi saluran dan prosentase tegangan jatuh.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam menentukan tegangan kerja pada saluran transmisi adalah sebagai berikut :

- a. Masukkan data kapasitas daya yang dikirim Pr (MW) dan panjang saluran (km)
- b. Masukkan data pemilihan tegangan standar (kV)
- c. Penentuan nilai koefisien kapasitas k
- d. Perhitungan daya saluran Prs (MW) dengan menggunakan rumus:

$$Prs = \frac{V^2}{1000.L}k \quad (2.1)$$

Dimana :

- Prs = Kapasitas daya saluran (MW)
- V = Tegangan standar (kV)
- k = Koefisien kapasitas
- L = Panjang saluran (km)

Besar nilai koefisien kapasitas dapat dilihat berdasarkan tabel 2.1 .

Tabel 2.1 Korelasi Tegangan Standar Terhadap Koefisien Kapasitas

Tegangan Standar (kV)	Koefisien Kapasitas (k)
70	600
150	800
275	800
500	800

Sumber : Syariffudin M Ir., M.Eng, Perencanaan Jaringan Transmisi Tegangan Tinggi

2.5 Komponen Utama Saluran Transmisi

Dalam konstruksi saluran transmisi udara, peralatan peralatan yang digunakan terdapat bermacam-macam, dan tiap peralatan tersebut mempunyai fungsi berlainan yang menunjang terlaksananya fungsi dari saluran transmisi, sehingga saluran tersebut dapat bekerja dengan baik. Pada saluran transmisi terdapat beberapa komponen utama yaitu diantaranya :

1. Menara.
2. Isolator.
3. Kawat Penghantar.
4. Kawat Pentanahan.

2.5.1 Menara Transmisi (Menara)

Tenaga listrik yang disalurkan lewat sistem transmisi umumnya menggunakan kawat telanjang sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar tersebut dengan benda sekelilingnya. Menara adalah konstruksi bangunan yang kokoh, berfungsi untuk menyangga/merentang kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang cukup agar aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya. Antara menara dan kawat penghantar disekat oleh isolator. [4] Pemilihan tipe menara mempengaruhi biaya karena terkait dengan desain, bahan, transportasi dan tenaga kerja, bahan galvanis alvanis baja, beton atau kayu umum digunakan pada saluran transmisi. Pembangunan menara merupakan bagian penting dari pembangunan saluran transmisi. Ada beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan ketika memilih metode konstruksi, antara lain :

- 1) Jenis struktur yang harus dibangun
- 2) Kondisi kontur jalur
- 3) Dimensi media yang berada dibawah jalur dan situasi jalur
- 4) Akses jalan ke lokasi

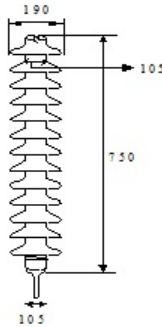
Faktor-faktor di atas ditentukan oleh apakah ada pilihan untuk menggunakan peralatan maksimum dan minimum tenaga kerja atau peralatan minimum dan tenaga kerja yang maksimal .

2.5.2 Isolator

Isolator adalah media penyekat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan. Fungsi isolator pada SUTT adalah untuk mengisolir kawat fasa dengan menara. [1] Pada umumnya isolator terbuat dari porselen atau kaca dan berfungsi sebagai isolasi tegangan listrik antara kawat penghantar dengan tiang.

Macam-macam isolator yang dipergunakan pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) adalah sebagai berikut : Isolator Piring yang dipergunakan untuk isolator penegang dan isolator gantung, dimana jumlah piringan isolator disesuaikan dengan tegangan sistem pada

Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) tersebut dapat dilihat pada gambar 2.3.

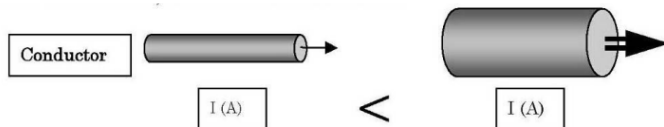


Gambar 2.3 Isolator Tonggak Saluran Vertikal

Besarnya isolasi pada umumnya 3 hingga 3,3 kali tegangan sistem, dimaksudkan akan tahan terhadap muka tegangan petir pada waktu 1,2 mikro detik. Apabila nilai isolasi menurun akibat dari polutan maupun kerusakan pada isolasinya, maka akan terjadi kegagalan isolasi yang akhirnya dapat menimbulkan gangguan. Sehingga perlu dilakukan pemilihan bahan isolator yang sesuai dengan kapasitas daya yang mengalir dan kekuatan mekanis. Oleh karena itu sifat suatu isolator ditentukan oleh bahan yang digunakan.

2.5.3 Kawat Penghantar

Kawat penghantar digunakan untuk menghantarkan energi listrik yang disalurkan. Merupakan suatu fakta bahwa arus mudah mengalir pada penampang yang lebih besar, dimana resistansinya lebih kecil.



Gambar 2.4 Aliran Arus Pada Penampang Konduktor

Untuk keperluan transmisi ada dua material yang umumnya digunakan yaitu aluminium dan tembaga. Berikut perbandingan antara dua jenis bahan konduktor tersebut. [5]

Tabel 2.2 Karakteristik Bahan Konduktor Tembaga dan Aluminium

Item	Tembaga	Aluminium
Kekuatan	Lebih kuat	Relative mudah putus, kekuatannya 75 % dari konduktor tembaga/
Hantaran Arus	Bagus, resistansi lebih kecil	Kurang, untuk nilai resistansi yang sama, ukuran lebih besar 1,6 kali konduktor tembaga
Berat	Lebih berat	Ringan, sama dengan 55% berat tembaga untuk ukuran yang sama
Harga	Lebih mahal	Murah

Konduktor dapat merupakan salah satu komponen biaya yang tinggi dalam sistem transmisi energi listrik. Pemilihan ukuran konduktor dilakukan untuk meminimalisasi biaya yang dibutuhkan dan kehilangan daya yang diakibatkannya. Biaya besar yang seharusnya tidak diperlukan dapat terjadi dengan pemilihan konduktor yang terlalu besar, apalagi dengan konduktor yang lebih besar akan lebih berat dan struktur penyangga juga harus lebih kuat yang pada akhirnya menambah pekerjaan dan biaya.

Ada beberapa pertimbangan dalam menentukan ukuran konduktor yang akan digunakan untuk transmisi dan distribusi tenaga listrik, diantaranya adalah :

- **Besarnya arus yang mengalir dalam konduktor**

Arus yang mengalir sebanding dengan daya yang dihasilkan dan ditransmisikan dengan mengikuti persamaan.

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \theta \quad (2.2)$$

Semakin besar arus maka konduktor yang diperlukan akan semakin besar pula. Periksa tabel daya hantar kabel sesuai jenis dan ukurannya sebelum menentukan ukuran kabel.

- **Jarak antara pembangkit dengan pusat beban** Hal ini adalah berkaitan dengan tegangan jatuh (voltage drop). Semakin jauh beban dari pembangkit maka akan semakin besar tegangan jatuh, hal ini disebabkan resistansi dalam konduktor. Semakin kecil

penghantar maka resistansi akan semakin besar. Sehingga semakin jauh jarak yang ditransmisikan maka konduktor yang dibutuhkan akan semakin besar untuk mengurangi tegangan jatuh tersebut.

- **Perkiraan peningkatan beban** Besarnya penghantar harus disesuaikan dengan kemungkinan peningkatan beban dimasa yang akan datang yang mana akan menyebabkan meningkatnya arus yang mengalir.
- **Kehilangan daya** Semakin besar arus yang mengalir dan semakin besar resistansi kabel akan mengakibatkan semakin besarnya kehilangan daya. Sesuai dengan persamaan :

$$P = I^2 x R \quad (2.3)$$

Dimana P = kehilangan daya, I = arus yang mengalir dan R = resistansi penghantar

2.5.4 Kawat Pentanahan

Kawat Tanah merupakan media untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir. Kawat ini dipasang di atas kawat fasa dengan sudut perlindungan yang sekecil mungkin, karena dianggap petir menyambar dari atas kawat. Namun jika petir menyambar dari samping maka dapat mengakibatkan kawat fasa tersambar dan dapat mengakibatkan terjadinya gangguan. Kawat pada menara tension dipegang oleh tension clamp, sedangkan pada menara suspension dipegang oleh suspension clamp. Pada tension clamp dipasang kawat jumper yang menghubungkannya pada menara agar arus petir dapat dibuang ke tanah lewat menara. [7]

Untuk keperluan perbaikan mutu pentanahan maka dari kawat jumper ini ditambahkan kawat lagi menuju ketanah yang kemudian dihubungkan dengan kawat pentanahan.

Jumlah dan posisi Kawat Tanah

Bahan kawat terbuat dari baja yang sudah digalvanis, maupun sudah dilapisi dengan almunium. Jumlah kawat tanah paling tidak, ada satu buah diatas kawat fasa, namun umumnya di setiap menara dipasang dua buah. Pemasangan yang hanya satu buah untuk dua penghantar akan membuat sudut perlindungan menjadi besar sehingga kawat fasa mudah tersambar petir. Jarak antara kawat tanah dengan kawat fasa di menara adalah sebesar jarak antar kawat fasa, namun pada daerah tengah gawangan dapat mencapai 120% dari jarak tersebut.

2.6 Pemilihan Jenis Konduktor

Dalam melakukan perencanaan saluran transmisi, pemilihan ukuran dan tipe konduktor merupakan hal yang penting. Ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan jenis konduktor yaitu :

2.6.1 Bahan Konduktor

Bahan konduktor yang dipergunakan untuk saluran energi listrik perlu memiliki sifat sifat sebagai berikut :

- a. Konduktivitas tinggi.
- b. Kekuatan tarik mekanikal tinggi
- c. Titik berat
- d. Biaya rendah
- e. Tidak mudah patah

2.6.2 Ukuran Konduktor

Penampang dan jumlah konduktor disesuaikan dengan kapasitas daya yang akan disalurkan, sedangkan jarak antar kawat fasa maupun kawat berkas disesuaikan dengan tegangan operasinya. Jika kawat terlalu kecil maka kawat akan panas dan rugi transmisi akan besar. Pada tegangan yang tinggi (SUTET) penampang kawat , jumlah kawat maupun jarak antara kawat berkas mempengaruhi besarnya korona yang ditengarai dengan bunyi desis atau berisik. Jarak kawat antar fasa SUTT 70kV idealnya adalah 3 meter, SUTT= 6 meter dan SUTET=12 meter. [8] Hal ini karena menghindari terjadinya efek ayunan yang dapat menimbulkan flash over antar fasa. Untuk mencari besarnya arus fasa pada saluran transmisi dapat dihitung berdasarkan pada rumus :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V_r} \quad (2.4)$$

Dimana :

- I = Arus tiap fasa (A)
S = Daya yang dikirim (MVA)
V_r = Tegangan Sistem (kV)

Dari perhitungan tersebut diatas, maka dapat dihitung besarnya arus yang mengalir pada konduktor yaitu dengan menggunakan rumus :

$$I_k = \frac{I}{np} \quad (2.5)$$

Dimana :

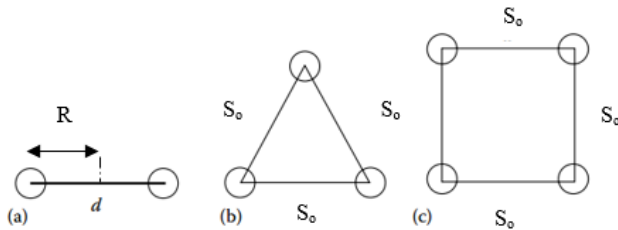
- I_k = Arus tiap konduktor (A)
- np = Jumlah konduktor tiap fasa
- I = Arus tiap fasa (A)

Pada perencanaan saluran transmisi standar pemilihan konduktor selalu mempertimbangkan faktor keamanan besarnya faktor keamanan biasanya 1,1 kalinya dari arus tiap kawat penghantar, dalam pemilihan diameter dan luas penampang konduktor dapat dilihat berdasarkan katalog dengan standar yang dipakai. [9]

2.6.3 Kawat Berkas

Kawat berkas (*Bundled* Konduktor) adalah konduktor yang terdiri dari dua konduktor atau lebih yang dipakai sebagai konduktor satu fasa. kawat berkas dinamakan juga konduktor dupleks, tripleks, dan lain-lain tergantung kepada jumlahnya dalam tiap berkas. Kawat berkas merupakan suatu metode mendekatkan konduktor satu sama lain pada jarak tertentu menggunakan spacer untuk mengurangi rugi-rugi korona.

Berikut konfigurasi dari kawat berkas :



Gambar 2.5 Konfigurasi Kawat Berkas

Spacer adalah alat perentang kawat penghantar terbuat dari bahan logam dan berengsel yang dilapisi karet yang berfungsi untuk:

1. Mengatur jarak pada bundle konduktor
2. Mempertahankan bentuk bundle sepanjang andongan
3. Memisahkan kawat berkas agar tidak beradu

4. Pada jarak yang diinginkan dapat mengurangi gangguan berisik
Adapun keuntungan menggunakan kawat berkas antara lain sebagai berikut:

1. Mengurangi reaktansi induktif saluran sehingga jatuh tegangan dapat diturunkan.
2. Mengurangi gradien tegangan permukaan konduktor sehingga dapat meningkatkan tegangan kritis korona dan mengurangi rugi-rugi daya korona.

Kerugian menggunakan kawat berkas antara lain:

1. Meningkatkan berat total saluran sehingga berpengaruh pada konstruksi menara.
2. Meningkatkan kapasitansi saluran.
3. Konstruksi isolator lebih rumit.
4. Meningkatkan investasi awal.

Besarnya jarak antar konduktor dalam satu *bundle* dapat dihitung menggunakan rumus :

$$R = \frac{S_0}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (2.6)$$

Untuk jarak yang sama maka :

- Untuk $n = 3$ maka, $R = S_0 / \sqrt{3}$
- Untuk $n = 4$ maka, $R = S_0 / \sqrt{2}$
- Untuk $n = 6$ maka, $R = S_0$
- Untuk $n = 8$ maka, $R = S_0 / (2 \cdot \sin 22,5^\circ)$

Dimana :

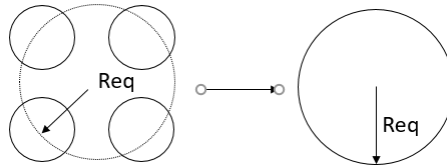
- R = Jarak konduktor dalam satu *bundle* ke pusat lingkaran
- S_0 = Jarak antar konduktor dalam satu *bundle*
- n = Jumlah konduktor dalam satu *bundle*

2.6.4 Perhitungan GMR dan GMD

Jika pada suatu *bundle* konduktor (fasa tertentu) terdiri dari beberapa konduktor bisa diasumsikan sebuah konduktor dengan jari-jari ekuivalen tertentu atau (Req). (Req) ini disebut dengan “jari-jari rata-rata

geometrik” atau GMR (*Geometric Mean Radius*). [7] Req atau GMR ditentukan dengan rumus :

$$Req = (n \cdot r \cdot R^{n-1})^{1/n} \quad (2.7)$$



Gambar 2.6 Geometrik Mean Radius (GMR)

Dengan mengetahui nilai R maka akan dilanjutkan dengan perhitungan GMR tergantung pada jumlah konduktor perfasa. Untuk perhitungan GMR dapat ditentukan dengan cara berikut :
Untuk $n = 2$ adalah :

$$Req = (2 \cdot r \cdot R^1)^{1/2} \quad (2.8)$$

Dimana :

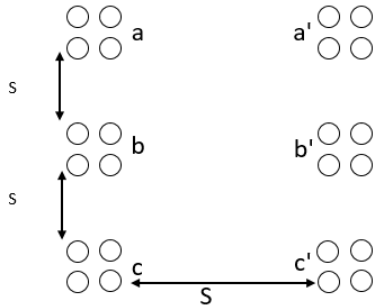
- r = Jari-jari sub konduktor (cm)
- R = Jari-jari sub *bundle* konduktor ke pusat lingkaran (cm)
- Req = *Geometric Mean Radius* (cm)
- n = Jumlah sub *bundle* konduktor

Pada sirkit vertikal ganda dengan menggunakan bundle konduktor, diameter ekuivalen (Deq) atau disebut juga GMD dapat dihitung dengan cara berikut :

$$GMD = \text{banyaknya } S \sqrt{S_{ab} \cdot S_{ac} \cdot S_{bc} \dots S_{xx}} \quad (2.9)$$

Dimana :

- GMD = Diameter ekuivalen (m)
- S = Jarak bebas antara dua fasa (m)



Gambar 2.7 Perhitungan GMD untuk Sirkuit Vertikal Ganda

2.6.5 Jarak Bebas Fasa ke Tanah (*Phase to Ground Clearance*)

Jarak antara penghantar minimum dengan tanah harus memenuhi kriteria yang disyaratkan untuk menjaga keselamatan manusia dan jaringan itu sendiri. Perhitungan jarak bebas fasa ke tanah diperoleh melalui rumus sebagai berikut :

$$G_c = 6,096 + ((V - 50) \times 0,0127) + 0,73(SAG_2 - SAG_1) \quad (2.10)$$

Dimana :

- V = Tegangan sisten (kV)
- SAG₁ = Andongan kawat maksimum (m)
- SAG₂ = Andongan kawat normal (m)
- G_c = *Ground clearance* (m)

2.6.6 Jarak Bebas Fasa ke Fasa (*Phase to Phase*)

Perhitungan jarak bebas fasa ke fasa menurut *Safety Code Formula* dapat diperoleh melalui persamaan sebagai berikut :

$$a = 0,3 \text{ inch per kV} + \sqrt[3]{\frac{b}{12}} \text{ inch}$$

Dimana :

- a = Jarak antar kawat (inch)
- b = Andongan (inch)

2.6.7 Resistansi Konduktor

Tahanan saluran transmisi merupakan penyebab terjadinya rugi daya nyata pada saluran transmisi, pada saluran transmisi arus bolak-balik pengertian tahanan saluran adalah tahanan arus bolak-balik atau tahanan efektif dari saluran. Besarnya tahanan saluran arus bolak-balik dipengaruhi oleh efek kulit, temperature dan konstruksi kawat saluran. [2] Besarnya nilai tahanan suatu konduktor dapat dinyatakan dalam rumus berikut ini :

$$R = \frac{1,337 \cdot \rho \cdot L}{r^2 \cdot n} \quad (2.11)$$

Dimana :

R = Resistansi tahanan konduktor (Ω)

ρ = Resistivitas aluminium = $2,7 \times 10^{-9}$ m pada suhu 20°C

α = Koefisien muai Panjang = $0,0000189$ / $^\circ\text{C}$ pada 20°C

L = Panjang Konduktor (m)

r = Jari-jari serat aluminium ACSR (m)

n = Jumlah serat dalam ACSR

Tahanan pada konduktor sangat dipengaruhi oleh suhu sehingga besarnya tahanan konduktor dapat ditulis secara matematis sebagai berikut :

$$R_{t_2} = R_{t_1} [1 + \alpha_1 (t_2 - t_1)] \quad (2.12)$$

Dimana :

R_{t_1} = Nilai tahanan pada suhu t_1 (Ω)

R_{t_2} = Nilai tahanan pada suhu t_2 (Ω)

α = Koefisien muai panjang pada suhu t_1 (m / $^\circ\text{C}$)

Besar kecilnya nilai resistansi konduktor akan berpengaruh terhadap saluran transmisi, diantaranya yaitu :

- Pemanasan pada konduktor akan menyebabkan rugi daya pada saluran.
- Semakin tinggi temperature maka KHA (kuat hantar arus) akan semakin berkurang

- c. Saat operasi *switching* bekerja pada tegangan tinggi menimbulkan efek gelombang berjalan.

2.7 Perencanaan Isolasi Saluran Transmisi

Dalam menghitung isolasi saluran transmisi ditentukan berdasarkan pertimbangan terhadap :

- Tegangan lebih luar (*external over voltage*)
- Tegangan lebih dalam (*internal over voltage*)
- Power frequency voltage stress

Tegangan lebih luar karena petir tidak dapat dihindarkan dan hanya dapat diperkecil pengaruhnya saja. Tegangan lebih dalam disebabkan karena surja hubung (*switching surge*) terjadi karena pembukaan dan penutupan pemutus beban (*circuit breaker*) pada sistem yang tidak ditanahkan efektif tegangan surja hubung dapat mencapai 3 s/d 4 kali tegangan fasa, sedangkan pada sistem yang ditanahkan efektif kira-kira 3 kali tegangan fasa. [8]

Power frequency voltage stress adalah merupakan tegangan abnormal pada frekuensi daya karena pembebanan yang berubah-ubah dengan cepat. Jadi perhitungan isolasi saluran transmisi harus didasarkan pertimbangan bahwa isolasi tersebut harus dapat diamankan dan tidak akan mengalami kegagalan karena tegangan lebih dalam, atau karena adanya tegangan abnormal pada frekuensi daya. Besarnya tegangan ketahanan terhadap surja hubung dan tegangan ketahanan pada frekuensi daya dapat dihitung sebagai berikut

Langkah-langkah dalam melakukan perencanaan isolasi adalah sebagai berikut :

- a. Memilih konfigurasi dan tipe isolator saluran transmisi
- b. Penentuan tegangan *critical flashover* V_{CFO} dan tegangan *flashover switching*
- c. Perhitungan koefisien keamanan k_1 (koefisien keamanan fasa tengah) dan k_2 (koefisien keamanan fasa pinggir) sebagai berikut :

Data yang dibutuhkan dalam perencanaan isolasi saluran transmisi yaitu tegangan sistem (kV), tipe string (I atau V), kontaminasi (Ktm), kondisi cuaca hu (%), perhitungan korona yang tergantung tipe string :

String berbentuk V : CR = 5%

String berbentuk I : Isolator gandeng : CR = 13%

Tanpa isolator gandeng : CR = 10%

Korelasi antara tingkat kontaminasi dengan presentase penurunan ketahanan tegangan isolator dapat dilihat pada tabel 2.3 (Standar IEC 815).

Tabel 2.3 Tingkat Kontaminasi

Kontaminasi berkategori	Lapisan garam (mg/cm ²)	% penurunan kekuatan isolator
Ringan	0,03 – 0,06	10%
Medium	0,1 – 0,2	20%
Berat	0,3 – 0,6	35%
Sangat berat	> 0,6	60%

Umumnya di wilayah Indonesia terdapat dua musim yaitu kondisi cerah dan kondisi hujan. Saat kondisi cerah pengaruh bagi isolator hanya sedikit, tetapi saat kondisi hujan penurunan ketahanan tegangan isolator dapat menurun hingga 5%. Sehingga dibutuhkan faktor penyimpangan standar (Ps) yaitu faktor keamanan yang sengaja diberikan untuk mengantisipasi penyimpangan yang mungkin terjadi sesuai dengan kondisi cuaca. Seperti ditunjukkan pada tabel berikut:

Kondisi Cuaca (Hu)	Penyimpangan (Ps)
Cerah	0 %
Hujan	5 %

- Perhitungan k_1 (koefisien keamanan fasa tengah) adalah :

$$k_1 = CR + ktm + hu + Ps$$

- Perhitungan k_2 (koefisien keamanan fasa pinggir) adalah :
Untuk string berbentuk I :

$$k_2 = k_1 - 0,11$$

Untuk string berbentuk V :

$$k_2 = k_1 - 0,05$$

- d. Untuk menghitung besar tegangan *flashover* pada fasa tengah maka dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

- Perhitungan tegangan *flashover* fasa tengah akibat *lightning* (V_{FLTL}) :

$$V_{FLTL} = (1+k_1)V_{CFO} \quad (2.13)$$

- Perhitungan tegangan *flashover* fasa tengah akibat *switching* (V_{FLTS}) :

$$V_{FLTS} = (1+k_1)V_W \quad (2.14)$$

- e. Untuk menghitung besar tegangan *flashover* pada fasa pinggir maka dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

- Perhitungan tegangan *flashover* fasa pinggir akibat *lightning* (V_{FLPL}) :

$$V_{FLPL} = (1+k_2)V_{CFO} \quad (2.15)$$

- Perhitungan tegangan *flashover* fasa pinggir akibat *switching* (V_{FLPS}) :

$$V_{FLPS} = (1+k_2)V_W \quad (2.16)$$

- f. Perhitungan jumlah isolator

Perhitungan ini dimaksudkan untuk menentukan jumlah isolator pada tiap *switching* dan *lightning* pada daerah tertentu. Berikut langkah-langkahnya :

- Menentukan jenis isolator dan data katalog isolator
- Penentuan jumlah dan panjang isolator tiap fasa

Dari grafik tegangan kritis flashover terhadap jumlah isolator (jis) tipe I atau tipe V maka akan didapat jumlah isolator tiap fasanya. Untuk string tipe : I *double* maka jis = 2 x jis. Panjang isolator dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$D(i) = I(i) \times Jis(i) \quad (2.17)$$

Dimana :

$D(i)$ = Panjang rangkaian isolator (m)
 $I(i)$ = Panjang tiap isolator (m) dari katalog
 $Jis(i)$ = Jumlah isolator yang diperoleh dari grafik

Besar jarak sambaran petir dapat dicari dengan mengetahui kerapatan udara dengan asumsi sepanjang jalur homogen, kondisi cuaca dengan suhu dan kelembapan udara adalah konstan, maka jarak sambaran dapat dihitung menggunakan rumus adalah :

$$SFP = D \times Hs \times \delta \quad (2.18)$$

Dimana :

SFP = Jarak sambaran (m)
 D = Panjang isolator (m)
 Hs = Kelembapan udara
 δ = Kerapatan udara

Untuk menentukan jarak *arcing horn* fasa pinggir :

$$GFP = \frac{SFP - 0,021}{1,115} \quad (2.19)$$

Dimana :

GFP = Jarak *arcing horn* (m)

2.7.1 Tegangan Surja *Switching* dan *Critical Flashover*

Dalam melakukan penentuan isolasi saluran transmisi tegangan *flash over* kritis (V_{CFO}) dan surja *switching* (V_w) dapat ditentukan dengan beberapa persamaan berikut : [9]

- a. Kenaikan tegangan yang diijinkan adalah 5% dari tegangan nominal sehingga :

$$V_{\max} = 1,05 V_{L-L} \text{ (kV)} \quad (2.20)$$

- b. Tegangan maksimum line ke netral (V_{L-N})

$$V_{L-N} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{\max} = 0,82 \times V_{\max} \text{ (kV)} \quad (2.21)$$

c. Tegangan *withstand switching surge crest* (V_w),

$$V_w = k \cdot V_{L-N} \text{ (kV)} \quad (2.22)$$

Dimana :

k = Faktor surja *switching withstand*

$k = 2 - 2,8$ pu

d. Tegangan *critical flashover* V_{CFO} ,

$$V_{CFO} = WF \times EF \times CF \times V_w \text{ (kV)} \quad (2.23)$$

Dimana :

EF = *Flashover to withstand factor* = 1,05

WF = *Non standard air conditions factor* = 1,05

CF = *Electrode effect factor* = 1,05

2.8 Perencanaan *Outline* Menara

Penentuan *outline* menara merupakan informasi dan perancangan dari sebuah menara (menara) yang dibutuhkan oleh seorang perencana dalam merencanakan suatu sistem transmisi. Dari data *outline* menara ini seorang perencana dapat menentukan tipe menara beserta ukuran-ukuran jarak bebas (*clearance*) yang bersangkutan dengan perencanaan menara. Ada beberapa hal yang dibutuhkan dalam penentuan *outline* menara yaitu:

- a. Andongan
- b. Jarak bebas ke tanah (*Ground Clearance*)
- c. Jarak vertikal dan horisontal antar kawat
- d. Diagram *clearance* dari jarak terhadap kawat fasa
- e. Panjang isolator.

Berikut ini merupakan jarak standar antar menara (span) dapat dilihat pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Standar Span

Level Tegangan (kV)	Span standar (m)
70	200 – 250
150	250 – 300
250	300 – 350
275	350 – 400
500	400 – 450

Sumber : Turan Gonen, Electric Of Power Transmission System Enggineering

2.8.1 Andongan (*Sagging*)

Andongan adalah jarak titik terendah dari sebuah konduktor dengan garis lurus konduktor tersebut yang dibentangkan pada dua titik. Sedangkan kekuatan tarik adalah kemampuan menahan suatu konduktor yang dibentangkan pada dua titik.

Kawat konduktor yang dipasang antara dua titik struktur pendukung menara transmisi tidak akan berbentuk suatu garis lurus horizontal, melainkan akan membentuk suatu andongan (*sag*). Besar andongan tergantung dari suhu udara sekeliling saluran. Pada siang hari, karena terik panas matahari, kawat juga akan menjadi panas dan sedikit memanjang dan andongan akan menjadi lebih besar, sebaliknya pada malam hari dengan kondisi udara yang lebih dingin, kawat akan menjadi lebih pendek sehingga mengencang dan andongan akan mengecil.

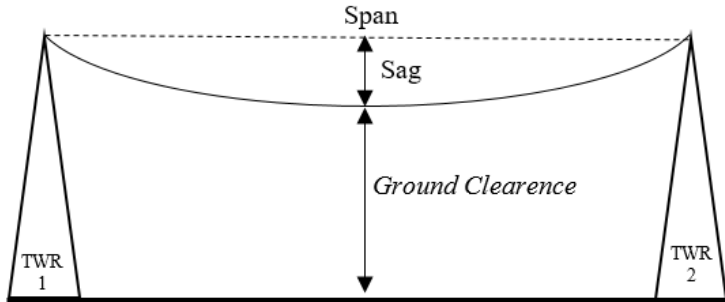
Andongan dan kekuatan tarik pada konduktor merupakan dua hal yang sangat penting dipertimbangkan pada saluran transmisi karena kekuatan tarik pada konduktor dapat menambah beban mekanik pada menara transmisi. Apabila kekuatan tarik terlalu besar maka dapat menyebabkan kegagalan mekanik pada konduktor itu sendiri. Faktor yang mempengaruhi andongan dan kekuatan tarik pada konduktor adalah

- Berat konduktor per satuan panjang
- Span (jarak antara dua menara transmisi)
- Temperatur

Kondisi topografi suatu wilayah juga mempengaruhi besar andongan suatu penghantar. Berdasarkan topografi perhitungan andongan dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

- Menara yang tingginya sama
- Menara yang tingginya berbeda

Berikut ini merupakan gambar andongan dan ruang bebas untuk saluran transmisi, bisa dilihat pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Andongan dan *Ground Clearance*

a. Andongan dua menara yang sama tinggi adalah :

$$SAG_1 = \frac{W.S^2}{8T} \quad (2.24)$$

$$Lo = S + \frac{W.S^2}{24T^2} \quad (2.25)$$

$$Lt = Lo [1 + a(t_{max} - t)] \quad (2.26)$$

$$SAG_2 = \sqrt{\frac{3S(Lt - S)}{8}} \quad (2.27)$$

b. Andongan dua menara berbeda tinggi adalah :

$$D = \frac{W.S^2}{8T} \quad (2.28)$$

$$SAG_1 = D \left(1 - \frac{H}{4D} \right)^2 \quad (2.29)$$

$$L_0 = S + \frac{W \cdot S^2}{24 \cdot T^2} \quad (2.30)$$

$$L_t = L_0 \left[1 + \alpha (t_{\max} - t) \right] \quad (2.31)$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{3S(L_t - S)}{8}} \quad (2.32)$$

$$SAG_2 = D_2 \left(1 - \frac{H}{4 \cdot D_2} \right)^2 \quad (2.33)$$

Dimana :

- W = Berat konduktor per satuan Panjang (kg/m)
- S = Panjang span (m)
- T = Tegangan mendatar penghantar (kg)
- L₀ = Panjang penghantar normal (m)
- L_t = Panjang penghantar maksimal (m)
- α = Koefisien ekspansi (muai Panjang konduktor)/°C
- t_{max} = Suhu maksimal penghantar (°C)
- t = Suhu kerja penghantar (°C)
- SAG₁ = Andongan normal (m)
- SAG₂ = Andongan maksimal (m)
- D₁D₂ = Variabel bantu

2.9 Pentanahan Kaki Menara

Pentanahan kaki menara adalah besarnya tahanan pada kontak/hubung antara menara (body) dengan tanah.

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya pentanahan :

- a. Tahanan jenis tanah
- b. Panjang jenis elektroda pentanahan
- c. Luas penampang elektroda pentanahan

Harga pentanahan makin kecil makin baik. Untuk perlindungan personil dan peralatan perlu diusahakan tahanan pentanahan lebih kecil dari 1 Ohm. Hal ini tidak praktis untuk dilaksanakan dalam suatu sistem distribusi, saluran transmisi, ataupun dalam substation distribusi. Beberapa peralatan/ standar yang telah disepakati adalah saluran

transmisi, substation harus direncanakan sedemikian rupa, sehingga tahanan pentanahan tidak melebihi harga satu ohm, Dalam Gardu-gardu Induk distribusi, harga tahanan maksimum yang diperbolehkan adalah 5 ohm. Demikian juga halnya pada menara transmisi, untuk menghindari lompatan karena naiknya tegangan/potensial pada waktu terjadi sambaran petir maka tahanan kaki menara perlu dibuat sekecil mungkin (di Amerika kurang dari 10 Ohm)

2.9.1 Batang Pengetanahan

Bila menghitung batang pengetanahan kaki menara dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$R = \frac{P}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{d} \right) \quad (2.34)$$

Dimana :

- R = Tahanan kaki menara (ohm)
- P = Tahanan jenis tanah (ohm-m)
- L = Panjang dari batang pengetanahan (m)
- d = Diameter batang pengetanahan (m)

Menurut persamaan diatas untuk menggunakan batang pentanahan secara paralel, rumus diatas tetap dapat digunakan untuk menghitung tahanan kaki menara, bila variable “d” diubah menjadi “A” dan jari-jari batang pentanahan sama sesuai persamaan (2.34). nilai A adalah kelipatan batang pengetanahan yang tergantung dari penempatan masing-masing batang pengetanahan sebagai berikut :

Penempatan :

- 2 batang diletakkan dimana saja $A = \sqrt{ar}$
- 3 batang diletakkan membentuk segi tiga $A = \sqrt[3]{a^2 \cdot r}$
- 4 batang diletakkan membentuk segi empat $A = \sqrt[4]{2^{1/2} \cdot a^3 \cdot r}$

Dimana :

- r = jari-jari dari masing-masing batang pengetanahan (harus sama)
- α = jarak antara batang pengetanahan

2.10 Korona Pada Saluran Transmisi

Ketika tegangan pada saluran transmisi tersebut masih rendah, stres dielektrik yang dialami oleh udara disekeliling konduktor tersebut tidak cukup untuk mengionisasi udara disekitar konduktor. Tapi ketika tegangan pada saluran transmisi ditingkatkan melebihi nilai ambang batas sekitar 30 kV yang dikenal sebagai titik tegangan *disruptive* kritis, maka udara disekitar konduktor mengalami stres cukup tinggi sehingga terjadi ionisasi terhadap ion-ion yang dikandung didalam udara tersebut.

Terjadinya ionisasi pada ion-ion diudara disekitar konduktor akan menimbulkan cahaya redup bersamaan dengan suara mendesis disertai dengan pembebasan ozon, yang mudah diidentifikasi karena baunya yang khas. Fenomena yang terjadi pada saluran transmisi tersebut dikenal sebagai **efek korona** dalam sistem tenaga listrik.

2.10.1 Tegangan *Disruptive Kritis*

Tegangan kritis disruptif merupakan tegangan minimal yang dibutuhkan untuk terjadinya ionisasi pertama kali dipermukaan konduktor. berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Peek's, kekuatan dielektrik udara maksimum pada kondisi standar dengan tekanan udara 1 atm (760 mmHg), suhu udara 25 °C adalah 30 kV/cm. Kekuatan dielektrik udara sebanding dengan kepadatan udara sekitar. Besarnya kepadatan udara dapat di rumuskan :

$$\delta = \frac{3,9211p}{273+t} \quad (2.35)$$

Dimana :

δ = Faktor kerapatan relatif udara (cmHg/°C)

p = Tekanan barometer (cmHg)

t = Temperatur sekeliling (°C)

Tegangan kritis disruptif dengan mempertimbangkan pengaruh faktor konduktor, keseragaman permukaan konduktor dan lingkungan sebagaimana diteliti oleh Peek's adalah sebagai berikut:

$$V_0 = \frac{E_0}{2.r.\ln(D/r)} \quad (2.36)$$

Jika besarnya gradien tegangan konduktor tunggal adalah :

$$E_0 = 21,1.r.\ln.(D/r) \quad (2.37)$$

Dimana :

- E_0 = Tegangan disruptive kritis (kV/cm)
- r = Jari-jari konduktor (cm)
- D = Jarak antar konduktor-konduktor (cm)

Maka untuk besarnya tegangan disruptive kritis dapat dihitung menggunakan rumus :

$$E_0 = 2110.\delta.m_o.r.\ln.(D_{eq}/R_{eq}) \text{ kV / Fasa} \quad (2.38)$$

Dimana :

- E_0 = Tegangan disruptive kritis (kV/Fasa)
- m_o = Faktor permukaan konduktor ($0 < m \leq 1$)
- δ = Faktor kerapatan relatif udara (cmHg/°C)

Untuk mengetahui berapa nilai faktor permukaan konduktor dapat dilihat pada tabel 2.5 Berikut ini.

Tabel 2.5 Faktor Permukaan Korona

Permukaan Konduktor	Meter
Silindris pejal dan permukaan halus	1,00
Baru atau belum terkena air	0,67 – 0,73
Terkena air atau hujan asam	0,91 – 0,93
Terkena debu	0,72 – 0,75
Untuk desain atau perencanaan	0,87 – 0,90

2.2.1 Rugi Daya Korona

Rugi-rugi korona akan semakin besar jika tegangan saluran terus dinaikkan melebihi tegangan kritis disruptif. Dalam beberapa penelitian telah dirumuskan beberapa persamaan empiris yang mempertimbangkan faktor penggunaan konduktor berkas. Persamaan yang digunakan untuk sistem tiga fasa dengan konduktor berkas dirumuskan oleh Anderson, Baretsky dan Mccarty para peneliti dari EHV project, USA. Besar rugi-

rugi korona pada kondisi cuaca hujan akan menghasilkan rugi korona yang lebih besar. Rugi daya korona dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$P_c = \frac{241}{\delta} (f + 25)^{1/2} (V - V_0) \times 10^{-5} \text{ kW/km} \quad (2.39)$$

Untuk menentukan rugi korona konduktor tiap fasa pada cuaca cerah untuk ialah :

$$P_c = \frac{0,000111}{\left(\ln \frac{2S}{d} \right)^2} f \cdot V^2 \cdot F \quad (2.40)$$

Dimana :

- P_c = Kerugian daya korona (kW/km)
- f = Frekuensi (Hz)
- V = Tegangan kerja efektif fasa ke netral (kV)
- S = Jarak konduktor (m)
- d = Diameter konduktor (m)
- F = Faktor rugi daya korona V/V_0

F merupakan konstanta yang dapat diketahui dengan cara membandingkan nilai tegangan fasa ke netral dengan nilai tegangan V_0 , dapat dilihat pada tabel 2.6 berikut ini.

Tabel 2.6 Fungsi Rugi Daya

V/V_0	F
0,6	0,012
0,8	0,018
1,0	0,05
1,2	0,083
1,3	0,14
1,4	0,32
3,5	0,92

Sumber : Turan Gonen, Electrical Of Power Transmission System Engineering

2.11 Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi

Saat sistem beroperasi, pada saluran transmisi terjadi rugi-rugi salah satunya dipengaruhi oleh rugi tahanan penghantar dan rugi korona. Jika tegangan transmisi adalah tegangan bolak-balik tiga fasa, maka besarnya rugi-rugi daya yang timbul adalah sebagai berikut ::

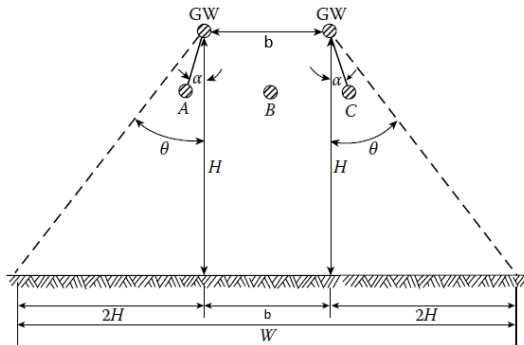
$$R_t = 3.n.(I_k)^2 .R \quad (2.41)$$

Dimana :

- R_t = Rugi-rugi tahanan saluran transmisi
- n = Jumlah konduktor tiap fasa
- I_k = Arus tiap konduktor
- R = Nilai tahanan resistansi kawat transmisi

2.12 Penangkapan Kilat oleh Saluran Transmisi

Suatu saluran transmisi diatas tanah dapat dikatakan membentuk bayang-bayang (prisai) listrik pada tanah yang berada di bawah saluran transmisi itu. Kilat yang biasanya menyambar tanah didalam bayang-bayang itu akan menyambar saluran transmisi sebagai gantinya, sedangkan kilat yang berada diluar bayang-bayang itu sama sekali tidak menyambar saluran. lebar bayang-bayang listrik untuk suatu saluran transmisi yaitu :



Gambar 2.9 Lebar Jalur Perisai Terhadap Sambaran Kilat
Lebar bayang-bayang (prisai) W adalah :

$$W = (b + 4h^{1,09}) \text{ meter} \quad (2.42)$$

Dimana :

- b = jarak pemisah antara kedua kawat tanah (meter)
(bila kawat tanah hanya satu, $b = 0$)
- h = tinggi rata-rata kawat tanah diatas tanah
- h_i = tinggi kawat tanah pada menara, meter

Berdasarkan geografis jalur saluran transmisi, Tinggi rata-rata kawat diatas tanah dibagi menjadi tiga kategori yaitu :

- a. Tanah datar :

$$h = h_i - 2/3 \text{ andongan}$$

- b. Tanah bergelombang :

$$h = h_i$$

- c. Tanah bergunung-gunung :

$$h = 2h_i$$

Sehingga, besarnya luas bayang-bayang setiap 100 km panjang saluran transmisi adalah :

$$A = 0,1(b + 4h^{1,09}) \text{ km}^2 \text{ per 100 km saluran} \quad (2.43)$$

2.13 Jumlah Sambaran Kilat Ke Bumi, Lompatan Api, dan Busur Api

Jumlah sambaran petir ke bumi berdasarkan penelitian besarnya berbeda-beda. Untuk sambaran petir di daerah tropis khususnya Indonesia mempunyai karakteristik petir yang berbeda dengan daerah sub-tropis. Angin regional dan angin lokal mempunyai pengaruh yang signifikan dalam proses pembentukan muatan di dalam awan, khususnya di daerah pegunungan. Jumlah sambaran kilat ke bumi nilainya sebanding dengan banyaknya musim guruh atau “*Iso Keraunic Level*” (IKL) ditempat itu. Untuk di Indonesia menggunakan :

$$N = 0,015 \text{ IKL}$$

$$(2.44)$$

Tabel 2.7 Relasi Antara Kerapatan Sambaran Kilat dan Hari Guruh

No	Lokasi	Kerapatan Sambaran Petir N (per km ² /tahun)	Penyidik
1.	India	0,10 IKL	Aiya (1968)
2.	Rhodesia	0,14 IKL	Anderson dan Jenner (1954)
3.	Afrika Selatan	0,023 IKL ^{1,3}	Anderson – Eriksen (1954)
4.	Swedia	0,004 IKL ²	Muller – Hillerbrand (1964)
5.	Inggris (UK)	a IKL ^b a = $2,6 \pm 0,2 \times 10^{-3}$ b = $1,9 \pm 0,1$	Stringfellow (1974)
6.	USA (bag. utara)	0,11 IKL	Horn & Ramsey (1951)
7.	USA (bag. selatan)	0,17 IKL	Horn & Ramsey (1951)
8.	USA	0,1 IKL	Anderson (1968)
9.	USA	0,15 IKL	Brown & Whitehead (1969)
10.	Rusia	0,036 IKL ^{1,3}	Kolokolov & Pavlova (1972)
11.	Dunia (iklim sedang)	0,19 IKL	Brooks (1950)
12.	Dunia (iklim sedang)	0,15 IKL	Golde (1966)
13.	Dunia (iklim tropis)	0,13 IKL	Brooks (1950)

(*) Untuk daerah sekitar katulistiwa dengan iklim tropis seperti di Indonesia dengan IKL berkisar antara 60 sampai 150, menggunakan $N = 0,015 \text{ IKL}$.

Sumber : T. S. Hutaaruk, Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja

Dimana :

N = jumlah sambara per km²

IKL = jumlah hari guruh per tahun

Jadi, jumlah sambaran pada saluran transmisi sepanjang 100 km adalah :

$$N_L = N.A \quad (2.45)$$

Atau,

$$N_L = 0,015IKL(b + 4h^{1,09}) \text{ sambaran per 100 km per tahun}$$

2.14 Radius Efektif Kawat Tanah dan Kawat Fasa dengan Korona

Kawat tanah atau kawat perisai (*shielding wire*) adalah kawat-kawat pada saluran transmisi yang ditempatkan di atas kawat-kawat fasa. Pada awalnya kawat tanah ini dimaksudkan sebagai perlindungan terhadap sambaran induksi kilat di sekitar kawat transmisi, jadi sambaran kilat tidak langsung. Akan tetapi kemudian ternyata dari hasil-hasil pengalaman maupun teori, sebab utama yang menimbulkan gangguan pada saluran transmisi tegangan tinggi adalah sambaran kilat langsung. Efisiensi perlindungan bertambah tinggi bila kawat tanah semakin dekat dengan kawat fasa. Untuk sambaran langsung kawat tanah melindungi kawat fasa, dan untuk memperoleh perisaian yang baik kedudukan kawat tanah harus memenuhi beberapa persyaratan yang penting :

- Jarak kawat tanah di atas kawat fasa diatur sedemikian rupa agar dapat mencegah sambaran langsung pada kawat-kawat fasa.
- Pada tengah gawang (mid span) kawat tanah harus memiliki jarak yang cukup di atas kawat fasa untuk mencegah terjadinya lompatan api samping (side flashover) selama waktu yang diperlukan untuk gelombang pantulan negatif dari menara kembali ke tengah gawang, dan ini akan mengurangi tegangan pada tengah gawang.
- Tahanan kaki menara harus cukup rendah untuk membatasi tegangan pada isolator agar tidak terjadi lompatan api pada isolator.

2.14.1 Radius Efektif Kawat Tanah dengan Korona

Dalam saluran transmisi tegangan tinggi umumnya kawat tanah terdiri dari kawat tunggal, sehingga radius dari amplop korona dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini :

$$R \cdot \ln \left(\frac{2h_t}{R} \right) = \frac{V}{E_0} \quad (2.46)$$

Dimana :

R = radius amplop korona (m)

h_i = tinggi kawat diatas tanah pada menara (m)

V = tegangan yang diterapkan pada kawat (kV)

E_0 = batas gradien korona, dimana amplop korona tidak dapat lagi timbul (kV/m)

Sambaran petir pada kawat tanah atau menara transmisi dapat menimbulkan efek lompatan api balik (*back flashover*) , hal ini dapat terjadi apabila isolasi udara mengalami kegagalan akibat kenaikan tegangan yang sangat tinggi pada menara transmisi. Arus puncak kilat yang biasanya menyebabkan yang mempunyai nilai diatas 80 kA.

Besar tegangan yang timbul pada isolator transmisi tergantung pada waktu gelombang kilat atau petir. Besar tegangan lompatan api dari gandengan isolator dapat diperoleh dari persamaan 2.47 dengan harga E_0 biasanya digunakan 1500 kV/m atau 15 kV/cm maka :

$$V_{50\%} = \left(K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \right) \times 10^3 \text{ kV} \quad (2.47)$$

Dimana :

$K_1 = 0,4 \text{ W}$

$K_2 = 0,71 \text{ W}$

W = panjang gandengan isolator (m)

t = waktu tembus atau waktu lompatan api isolator (mikro detik)

2.14.2 Radius Efektif Kawat Berkas dengan Korona

Pada perencanaan saluran transmisi untuk kawat berkas, dengan adanya sub konduktor menyebabkan pengurangan yang sangat besar pada diameter korona efektif dari tiap sub konduktor, besarnya radius efektif kawat berkas tanpa adanya korona dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$r_{eki} = \sqrt[N]{r_1 d_{12} d_{13} \dots \dots \dots d_{1N}} \quad (2.48)$$

Dimana :

r_1 = radius sub konduktor 1

d_{1N} = jarak sub konduktor 1 ke sub konduktor / sampai N

N = jumlah sub konduktor

Radius amplop korona R dapat dihitung dengan menggunakan persamaan radius efektif dari kawat berkas dengan korona adalah :

$$R_c = R + r_{eki}$$

Pada persamaan (2.48) untuk menghitung radius amplop tanpa dipengaruhi korona.

2.15 Impedansi Surja Kawat dan Impedansi Surja Menara

Perhitungan impedansi surja kawat tanah dibedakan dalam dua keadaan, yaitu keadaan bila tidak ada korona dan yang kedua bila terjadi korona. Untuk SUTET selalu dianggap terjadi korona. Untuk SUTT biasanya digunakan rumus-rumus tanpa korona namun untuk mengetahui kegagalan dengan pengaruh korona impedansi surja kawat tunggal dapat dihitung menggunakan rumus matematis berikut :

$$Z_{nn} = 60 \sqrt{\ln \frac{2h_t}{r} \cdot \ln - \frac{2h_t}{R}} \quad (2.49)$$

Dimana:

Z_{nn} = impedansi surja sendiri kawat n, (ohm)

h_t = tinggi kawat diatas tanah pada menara, (m)

r = radius kawat, (m)

R = radius amplop korona, (m)

Impedansi surja ekuivalen dari dua kawat tanah adalah :

$$Z_g = \frac{Z_{11} + Z_{22} + Z_{12}}{4} \quad (2.50)$$

Dimana :

Z_g = impedansi surja sendiri ekuivalen dari dua kawat tanah (Ω)

Z_{11} = impedansi surja sendiri kawat tanah 1 (Ω)
 Z_{22} = impedansi surja sendiri kawat tanah 2 (Ω)
 Z_{12} = impedansi surja Bersama antara kawat tanah 1 dan 2 (Ω)

Pada umumnya kedua kawat tanah itu identik, jadi $Z_{11} = Z_{22}$, sehingga impedansi surja ekuivalen kawat tanah adalah :

$$Z_g = \frac{Z_{11} + Z_{12}}{2} \quad (2.51)$$

Sedangkan, untuk mengetahui impedansi kawat konduktor fasa yang terdiri dari kawat berkas (*bundle* konduktor) adalah menggunakan persamaan :

$$Z_\phi = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r_{eki}} \cdot \ln \frac{2h}{R_c}} \quad (2.52)$$

Dimana :

- h = Tinggi rata-rata kawat fasa diatas tanah (m)
- r_{eki} = Radius ekuivalen kawat berkas (m)
- R_c = Radius korona kawat berkas (m)

3.11 Kegagalan Perisaian

Menara transmisi adalah target yang mudah untuk disambar petir. Strukturnya yang tinggi dan berada ditempat terbuka adalah penyebabnya. Kawat tanah adalah salah satu komponen sistem proteksi petir yang awam terpasang pada menara transmisi. Idealnya kawat tanah inilah yang akan dikenai sambaran petir, bukan kawat konduktornya. Provoost mengemukakan mengenai peran kawat tanah terhadap saluran transmisi. Berdasarkan teori tersebut ditarik kesimpulan bahwa :

- Untuk sudut perisaian $\theta \leq 18^\circ$ perisaian kawat transmisi baik
- Untuk sudut perisaian $\theta \leq 30^\circ$ kurang baik
- Untuk sudut perisaian $\theta > 40^\circ$ buruk

Jumlah gangguan petir karena kegagalan perisaian adalah sebagai fungsi dari sudut perisaian θ dan tinggi menara h seperti yang terlihat pada persamaan berikut :

$$\log \phi = \frac{\theta \sqrt{h_1}}{90} - 4 \quad (2.53)$$

Dimana :

ϕ = hasil bagi dari jumlah kilat yang mengenai kawat fasa dan jumlah kilat yang mengenai saluran transmisi

θ = sudut perisaian pada menara ($^{\circ}$)

h_1 = Tinggi kawat tanah pada menara (m)

Maka jumlah gangguan karena kegagalan prisai adalah

$$N_{SF} = \phi N_L \eta \quad (2.54)$$

Pada waktu itu persamaan (2.53) dianggap oleh sebagian insinyur saluran transmisi lebih unggul dari cara-cara lain. Akan tetapi dengan bertambah tingginya tegangan operasi saluran transmisi hasil-hasil yang diberikan oleh persamaan (2.54) terlalu tinggi. Oleh karena itu muncul teori elektro-geometris yang dikemukakan oleh Whitehead.

Berdasarkan teori elektogeometris menara dan jarak sambaran petir besarnya bergantung pada besar arus petir. Sehingga besarnya jarak sambaran dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$S = 8.I^{0,65} \text{ m} \quad (2.55)$$

Dimana :

S = Jarak sambaran (m)

I = Arus petir (kA)

Nilai arus petir minimum yang menyambar kawat fasa yang dapat menimbulkan lompatan api pada isolator dapat dihitung dengan persamaan berikut,

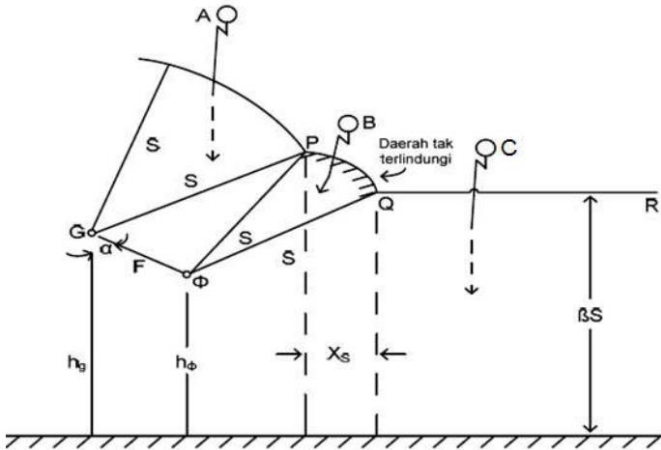
$$I_{\min} = \left(\frac{2.V_{50\%}}{Z_{\phi}} \right)$$

Dimana :

$V_{50\%}$ = Tegangan lompatan api kritis isolator (kV)

Z_{ϕ} = Impedansi surja kawat fasa dalam pengaruh korona (Ω)

Berikut ini merupakan gambar perisaian yang tidak sempurna, bisa dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Perisaian Tidak Sempurna

Sambaran A akan mengakhiri lompatan pada kawat karena berada pada busur PQ, dan jarak ke kawat fasa melebihi S . Kawat C hanya akan melompati kawat βS karena berada pada garis QR, dan jaraknya ke kawat fasa melebihi βS . Koefisien β memiliki kecenderungan yang kuat, bahwa jarak sambaran akhir dari petir ke bumi Harga koefisien β menurut Anderson sebagai berikut :

- β = Saluran udara tegangan tinggi (SUTT) = 1
- = Saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) = 0,8
- = Saluran udara tegangan ultra tinggi (SUTUT) = 0,67

Sambaran β segera setelah mencapai busur PQ akan menyambar hanya kawat fasa karena jaraknya ke kawat tanah dan bumi lebih besar dari jarak sambaran. Dalam pembahasan ini diasumsikan bahwa semua sambaran vertikal. Lebar X_s merupakan daerah yang tidak terlindungi dari sambaran petir secara langsung sehingga sambaran mengenai kawat fasa. Lebar daerah yang terlindungi dapat dicari berdasarkan persamaan berikut

Bila $\beta S > Y_\phi$,

$$X_s = S(\cos \theta + \sin(a_s - \omega)) \quad (2.56)$$

Dengan,

$$\begin{aligned} \theta &= \sin^{-1}\left(\frac{\beta S - Y_\phi}{S}\right) \\ \omega &= \cos^{-1}\left(\frac{F}{2S}\right) \\ a_s &= \tan^{-1}\left(\frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi}\right) \end{aligned}$$

Dimana :

X_ϕ dan Y_ϕ = koordinat kawat fasa
 X_g dan Y_g = kordinator kawat tanah

Bila $\beta S < Y_\phi$, $\cos \theta$ diambil = 1, sehingga

$$X_s = S(1 + \sin(a_s - \omega)) \quad (2.57)$$

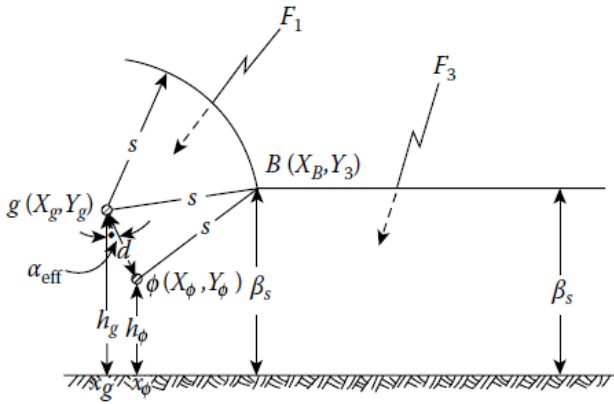
Bila perisaian sempurna, X_s menjadi 0, sehingga sudut perisaian menjadi,

$$a_s = \tan^{-1}\left(\frac{X_G}{Y_\phi - Y_G}\right) \quad (2.58)$$

Dengan,

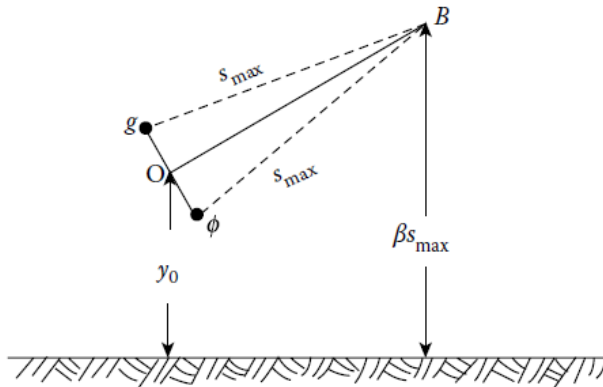
$$X_G = \left[S^2 - (\beta S - Y_\phi)^2 \right]^{1/2} - \left[S^2 - (\beta S - Y_G)^2 \right]^{1/2}$$

Berikut ini merupakan gambar perisaian yang sempurna atau efektif, bisa dilihat pada gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2.11 Perisaian Sempurna

Bila sambaran kilat mendekati arah S dari saluran dan bumi, sambaran itu akan dipengaruhi oleh benda apa saja yang berada di bawah dan melompati jarak S disebut jarak sambaran. Dan ini lah konsep dari teori elektro geometris itu S_{max} adalah jarak sambaran maksimum. Menurut teori elektrogeometris hanya nilai arus-arus yang berada di luar daerah I_{min} dan I_{max} yang dapat menyebabkan kegagalan perisaian. Jarak sambaran ini yang berpengaruh pada nilai I_{max} yang menyebabkan kegagalan perisaian. Berikut ini gambar cara menentukan Y_0 untuk memperoleh nilai S_{max} , bisa dilihat pada gambar 2.12 dibawah ini.



Gambar 2.12 Cara Menentukan Harga Y_0 Untuk Memperoleh S_{max}

Jadi,

$$S_{\max} \approx BO = Y_0 \left| \frac{B_s - \sqrt{B_s^2 + A_s C_s}}{A_s} \right| \quad (2.59)$$

Dengan,

$$Y_0 = \frac{Y_G + Y_\phi}{2}$$

$$A_s = m^2 - m^2 \beta^2 - \beta^2$$

$$B_s = \beta(m^2 + 1)$$

$$C_s = (m^2 + 1)$$

$$m = \text{kemiringan garis OB} = \frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi}$$

Nilai arus yang berada di luar daerah antara I_{\min} dan I_{\max} adalah nilai arus yang menyebabkan kegagalan perisaian. Harga rata-rata lebar yang tidak terlindungi adalah $X_s/2$, dan lebar inilah yang digunakan untuk mengitung jumlah kegagalan perisaian. Probabilitas arus melebihi arus tertentu adalah menggunakan persamaan :

$$P_I = e^{-I/34} \quad (2.59)$$

Jadi bila probabilitas arus melebihi arus minimum dan arus maksimum diberikan oleh P_{\min} dan P_{\max} , maka jumlah kegagalan perisaian per 100 km per tahun adalah :

$$N_{SF} = 0,015 \text{ IKL} \frac{X_s}{2} (P_{\min} - P_{\max}) \quad (2.60)$$

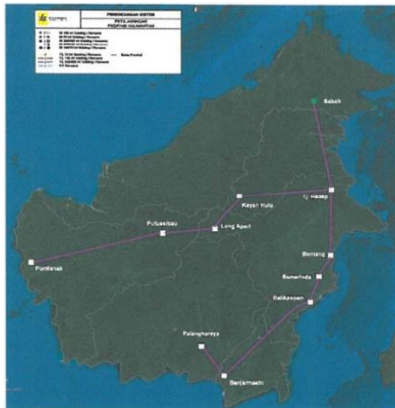
BAB 3

PERENCANAAN SALURAN TRANSMISI KAYAN HYDROPOWER KE GRID KALIMANTAN

3.1 Rencana Jalur SUTT 150kV Kayan-Grid Kalimantan

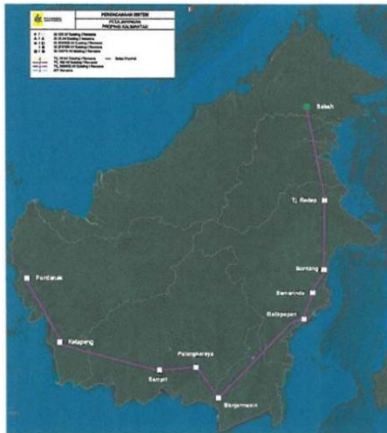
Berdasarkan RUPTL PLN 2019-2028 mengenai rencana jaringan transmisi di Kalimantan. Dalam jangka panjang, sistem tenaga listrik se-Kalimantan direncanakan akan terhubung menjadi satu yaitu Grid Kalimantan sebagai *backbone* Interkoneksi Sistem Kalimantan. Sistem Jalur transmisi yang diusulkan ada 3 jalur alternatif yaitu :

1. Jalur Utara dengan melalui Pontianak (Kalbar) - Putussibau (Kalbar) - Long Apari (Kaltim) - Kayan Hulu (Kaltara) - Tanjung Redep (Kaltara) - Bontang (Kaltim) - Samarinda (Kaltim) - Balikpapan (Kaltim) - Banjarmasin (Kalsel) - Palang Karaya (Kalteng). Serta terdapat interkoneksi antara Tanjung Redep (Kaltara) dengan Sabah (Malaysia).



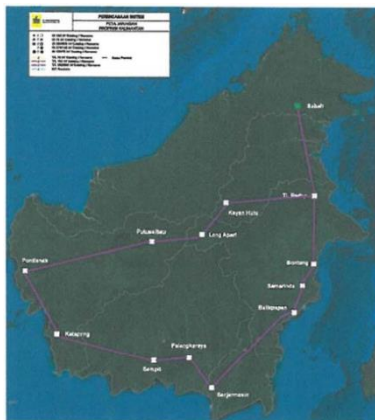
Gambar 3.1 Jalur Utara

2. Jalur Selatan dengan melalui Pontianak (Kalbar) - Ketapang (Kalbar) - Sampit (Kalteng) - Palang Karaya (Kalteng) - Banjarmasin (Kalsel) - Balikpapan (Kaltim) - Tanjung Redep (Kaltara) - Sabah (Malaysia).



Gambar 3.2 Jalur Selatan

3. Jalur Ring dengan melalui Pontianak (Kalbar) - Ketapang (Kalbar) -Sampit (Kalteng) - Palangkaraya (Kalteng) - Banjarmasin (Kalsel)- Balikpapan (Kaltim) - Samarinda (Kaltim) - Bontang (Kaltim) - Tanjung Redep (Kaltara) - Long Apari (Kaltim) - Putussibau (Kalbar) - Pontianak (Kalbar). Serta terdapat interkoneksi antara Tanjung Redep (Kaltara) - Sabah (Malaysia).



Gambar 3.3 Jalur Ring

3.2 Rencana Jalur SUTT 150kV *Kayan Hydropower-Long Apari*

Dalam perencanaan pengembangan saluran transmisi langkah yang dilakukan yaitu interkoneksi Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara. Salah satu pembangkit yang saat ini sudah di rencanakan pembangunannya untuk wilayah Kalimantan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di sungai Kayan yang berkapasitas 6x150 MW dengan total daya 900MW, Sehingga akan dibangun saluran transmisi (SUTT) 150 kV sepanjang 110 kms dari *Kayan Hydropower* ke Long Apari sebagaimana direncanakan pada penelitian tugas akhir ini. Pada pemilihan rute saluran ada beberapa jalur alternatif yang dapat digunakan namun berdasarkan beberapa pertimbangan diantaranya yaitu kontur tanah maka rencana rute saluran *Kayan-Long Apari* dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rencana Rute Saluran Kayan-Long Apari

3.3 Kondisi Geografis Daerah Saluran Transmisi

Provinsi Kalimantan Utara merupakan Provinsi ke-34 di Indonesia dan merupakan provinsi termuda dari seluruh Provinsi yang ada di Indonesia.

Provinsi Kalimantan Utara terdiri dari 4 Kabupaten 1 Kota yaitu :

1. Kabupaten Bulungan
2. Kabupaten Malinau

3. Kabupaten Nunukan
4. Kabupaten Tana Tidung
5. Kota Tarakan

Letak geostrategis Provinsi Kalimantan Utara berbatasan dengan :

Batas Utara : Negara Malaysia Bagian Sabah
 Batas Selatan : Kabupaten Kutai Barat, Kutai Timur, Kutai Kertanegara Kan Kab. Berau Prov Kaltim
 Batas Timur : Laut Sulawesi
 Batas Barat : Negara Malaysia Bagian Serawak

Letak Geografis Provinsi Kalimantan Utara memiliki lokasi yang sangat strategis dan menguntungkan, karena daerahnya di lewati oleh alur pelayaran yang termasuk dalam kategori Alur Laut Kawasan Indonesia II (ALKI II) yang sering dilewati oleh kapal kapal yang berlayar dari perairan Indonesia ke alur pelayaran internasional meliputi Kawasan Malaysia, Filipina, Brunei, Singapore dan negara-negara ASEAN, serta negara-negara Asia Pasifik seperti Hongkong, China, Korea Selatan dan Jepang.

Provinsi Kalimantan Utara merupakan provinsi yang berbatasan langsung dengan negara tetangga Malaysia, tepatnya dengan Bagian Sabah dan Serawak, Malaysia. Untuk daerah daratan terdapat + 1.038 km garis perbatasan antara Provinsi Kalimantan Utara dengan Negara Malaysia.

Luas wilayah adminstratif : ± 75.467,70 km², terdiri dari :

Kabupaten Bulungan	: + 13.925,72 km ²
Kabupaten Nunukan	: + 13.841,90 km ²
Kabupaten Malinau	: + 42.620,70 km ²
Kabupaten Tana Tidung	: + 4.828,58 km ²
Kota Tarakan	: + 250,80 km ²

Tabel 3.1 Kondisi Geografis Daerah Saluran Transmisi

Bulan <i>Month</i>	Suhu Udara Rata-rata ($^{\circ}$ C)	Kelembaban Udara Relative Humidity (%)	Tekanan Udara Atmospheric Pressure (Mbs)	Kecepatan Angin Wind Velocity (Knot)	Curah Hujan <i>Rain Fall</i> (mm)	
	-1	-4	-5	-6	-7	-8
1. Januari	26	91	1012,9	4	350,4	
2 Februari	26	89	1012,2	4	87,3	
3 Maret	26,1	89	1013,8	4	229,4	
4 April	27,2	86	1011,1	4	119,7	
5 Mei	27,3	86	1011,2	4	140,6	
6 Juni	26,4	85	1010,6	4	128,4	
7 Juli	27,5	80	1009,3	5	27	
8 Agustus	27,3	78	1010,8	5	72,4	
9 September	28	79	1009,6	4	138	
10-Okt	27,3	82	1010,2	4	190,7	
11 November	26,1	87	1008,9	4	178,2	
12 Desember	27,3	86	1010	4	164,8	
Rata-rata 2015	26,9	85	1010,9	4	152,2	
<i>Mean</i> 2014	26,9	86	1013,5	4	149,2	
2013	27	87	1012,6	4	245,1	
2012	26,9	87	1010,8	4	203,3	
2011	27,1	85	1008,4	3	259,8	
2010	27,6	83	1008,5	4	212,4	

3.4 Perencanaan Perlengkapan SUTT

Dalam perencanaan perlengkapan SUTT dibagi menjadi 4 bagian utama yaitu :

1. Perencanaan Konduktor
2. Perencanaan Menara
3. Perencanaan Isolator
4. Dan Perencanaan Kawat Pentanahan

3.5 Rencana Pemilihan Konduktor

Jenis dan type konduktor untuk penghantar SUTT terdapat beberapa macam, pemilihan jenis/type konduktor berpengaruh pada perhitungan andongan atau perencanaan jalur transmisi. Untuk itu perlu diketahui jenis dan type konduktor yang akan digunakan agar tidak salah dalam perencanaan jalur SUTT.

3.5.1 Bahan konduktor

Bahan konduktor yang dipergunakan untuk saluran energi listrik perlu memiliki sifat sifat sebagai berikut :

1. Konduktivitas tinggi.
2. Kekuatan tarik mekanikal tinggi.

3. Titik berat.
4. Biaya rendah.
5. Tidak mudah patah

Konduktor jenis Tembaga (BC : Bare copper) merupakan penghantar yang baik karena memiliki konduktivitas tinggi dan kekuatan mekanikalnya cukup baik. Namun karena harganya mahal maka konduktor jenis tembaga rawan pencurian. Aluminium harganya lebih rendah dan lebih ringan namun konduktivitas dan kekuatan mekanikalnya lebih rendah dibanding tembaga. Pada umumnya SUTT menggunakan ACSR (*Aluminium Konduktor 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.

Untuk daerah yang udaranya mengandung kadar belerang tinggi dipakai jenis ACSR/AS, yaitu kawat steelnya dilapisi dengan aluminium. Pada saluran transmisi yang perlu dinaikkan kapasitas penyalurannya namun SUTT tersebut berada di daerah yang rawan longsor, maka dipasang konduktor jenis TACSR (*Thermal 67 Aluminium Konduktor Steel Reinforced*) yang mempunyai kapasitas besar tetapi berat kawat tidak mengalami perubahan yang banyak. Konduktor pada SUTT merupakan kawat berkas (stranded) atau serabut yang dipilin, agar mempunyai kapasitas yang lebih besar dibanding kawat pejal.

Beberapa faktor yang harus dipertimbangkan ketika memilih konduktor meliputi:

1. Sag (andongan)
2. MWT/Ketegangan pada konduktor
3. Apakah ada atau tidak kondisi korosif
4. Kondisi jalur apakah rentan terhadap getaran
5. Kemampuan penyaluran dan kerugian daya yang diperbolehkan pada jalur transmisi
6. Kerugian tegangan yang di iijinkan
7. Iklim di lokasi transmisi

Dari beberapa pertimbangan di atas maka pemilihan konduktor untuk SUTT *Kayan Hydropower-Long Apari 150 kV* akan direncanakan menggunakan konduktor ACSR.

3.5.2 Urutan fasa

Pada sistem arus putar, keluaran dari generator berupa tiga fasa, setiap fasa mempunyai sudut pergerseran fasa 120°. Pada SUTT dikenal

fasa R; S dan T yang urutan fasanya selalu R diatas, S ditengah dan T dibawah. Namun pada SUTET urutan fasa tidak selalu berurutan karena selain panjang, karakter SUTET banyak dipengaruhi oleh faktor kapasitansi dari bumi maupun konfigurasi yang tidak selalu vertikal. Guna keseimbangan impedansi penyaluran maka setiap 100 km dilakukan transposisi letak kawat fasa.

3.5.3 Penampang dan jumlah konduktor.

Penampang dan jumlah konduktor disesuaikan dengan kapasitas daya yang akan disalurkan, sedangkan jarak antar kawat fasa maupun kawat berkas disesuaikan dengan tegangan operasinya. Jarak kawat antar fasa SUTT 70 kV idealnya adalah 3 meter, SUTT 150 kV = 6 meter dan SUTET=12 meter. Hal ini karena menghindari terjadinya efek ayunan yang dapat menimbulkan flash over antar fasa.

Jika kawat terlalu kecil maka kawat akan panas dan rugi transmisi akan besar. Pada tegangan yang tinggi (SUTET) penampang kawat , jumlah kawat maupun jarak antara kawat berkas mempengaruhi besarnya korona yang ditengarai dengan bunyi desis atau berisik.

3.5.4 Perlengkapan kawat penghantar

Perlengkapan atau fitting kawat penghantar adalah: Spacer, vibration damper. Untuk keperluan perbaikan dipasang repair sleeve maupun armor rod. Sambungan kawat disebut joint. Sambungan kawat adalah material untuk menyambung konduktor penghantar yang cara penyambungannya dengan alat press tekanan tinggi.

Ada 2 jenis teknik penyambungan konduktor penghantar ACSR, TACSR & ACCC, yaitu :

1. Sambungan dengan puntiran (sekarang sudah jarang dipergunakan)
2. Sambungan dengan *press*

Sambungan konduktor penghantar dengan *press* terdiri dari :

- a. Selongsong *steel*, berfungsi untuk menyambung *steel* atau bagian dalam konduktor penghantar ACSR & TACSR.
- b. Selongsong aluminium berfungsi untuk menyambung aluminium atau bagian luar konduktor penghantar ACSR & TACSR.
- c. Selongsong *steel*, berfungsi untuk menyambung *Composite Carbon* dalam konduktor penghantar ACCC.
- d. Selongsong aluminium berfungsi untuk menyambung aluminium atau bagian luar konduktor penghantar ACCC.

Penempatan *midspan joint* harus memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

- a. Diusahakan berada di tengah-tengah gawang atau bagian terendah dari andongan konduktor.
- b. Tidak boleh berada di dekat menara *tension* Tidak boleh di atas jalan raya, rel KA, SUTT, dll

1. **Repair Sleeve**

Repair sleeve adalah selongsong aluminium yang terbelah menjadi dua bagian dan dapat ditangkapi pada kawat penghantar, berfungsi untuk memperbaiki konduktivitas kawat yang rantas, Cara pemasangannya dipress dengan hydraulic tekanan tinggi

2. **Bola Pengaman**

Bola pengaman adalah rambu peringatan terhadap lalu lintas udara, berfungsi untuk memberi tanda kepada pilot pesawat terbang bahwa terdapat kawat transmisi. Bola pengaman dipasang pada *ground wire* pada setiap jarak 50m hingga 75 meter sekitar lapangan/bandar udara.

3. **Lampu Aviasi**

Lampu aviasi adalah rambu peringatan berupa lampu terhadap lalu lintas udara, berfungsi untuk memberi tanda kepada pilot pesawat terbang bahwa terdapat kawat transmisi. Jenis lampu aviasi adalah sebagai berikut.

- Lampu aviasi yang terpasang pada menara dengan supply dari Jaringan tegangan rendah
- Lampu aviasi yang terpasang pada kawat penghantar dengan sistem induksi dari kawat penghantar

4. **Arching Horn**

Arcing horn adalah peralatan yang dipasang pada sisi Cold (menara) dari rencengan isolator. Fungsi arcing horn:

- Media pelepasan busur api dari tegangan lebih antara sisi Cold dan Hot (kawat penghantar)
- Pada jarak yang diinginkan berguna untuk memotong tegangan lebih bila terjadi: sambaran petir; switching; gangguan, sehingga dapat mengamankan peralatan yang lebih mahal di Gardu Induk (Trafo) Media semacam arcing horn yang terpasang pada sisi Hot (kawat penghantar) adalah:
 - **Guarding ring** : berbentuk oval, mempunyai peran ganda yaitu sebagai arcing horn maupun pendistribusi tegangan pada beberapa isolator sisi hot. Umumnya dipasang di

setiap menara tension maupun suspension sepanjang transmisi

3.6 Rencana Pemilihan Menara

Tenaga listrik yang disalurkan lewat sistem transmisi umumnya menggunakan kawat telanjang sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar tersebut dengan benda sekelilingnya. Menara adalah konstruksi bangunan yang kokoh, berfungsi untuk menyangga/merentang kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang cukup agar aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya. Antara menara dan kawat penghantar disekat oleh isolator.

Konstruksi menara baja (*Lattice* Menara) merupakan jenis konstruksi SUTT yang paling banyak digunakan di jaringan PLN karena mudah dirakit terutama untuk pemasangan di daerah pegunungan dan jauh dari jalan raya. Menara transmisi yang digunakan pada saluran transmisi udara dari Kayan Hydropower ke Grid Kalimantan yaitu menara transmisi dengan jenis *lattice* menggunakan level tegangan 150 kV yang terbuat dari baja, dengan span atau jarak antar menara antara 250-300 meter dengan jarak lokasi sejauh ± 100 kms. Dalam melakukan perencanaan menara saluran transmisi perlunya diketahui berbagai macam fungsi yang dimiliki menara saluran transmisi, antara lain :

Menara harus kuat terhadap beban yang bekerja padanya yaitu:

1. Gaya berat menara dan kawat penghantar (gaya tekan).
2. Gaya tarik akibat rentangan kawat.
3. Gaya angin akibat terpaan angin pada kawat maupun badan menara.

Menurut fungsinya menara dibagi atas 7 macam yaitu.

- *Dead end* menara yaitu tiang akhir yang berlokasi di dekat Gardu induk, menara ini hampir sepenuhnya menanggung gaya tarik.
- *Section* menara yaitu tiang penyekat antara sejumlah menara penyangga dengan sejumlah menara penyangga lainnya karena alasan kemudahan saat pembangunan (penarikan kawat), umumnya mempunyai sudut belokan yang kecil.
- *Suspension* menara yaitu menara penyangga, menara ini hampir sepenuhnya menanggung gaya berat, umumnya tidak mempunyai sudut belokan.

- *Tension* menara yaitu menara penegang, menara ini menanggung gaya tarik yang lebih besar daripada gaya berat, umumnya mempunyai sudut belokan.
- *Transposition* menara yaitu menara tension yang digunakan sebagai tempat melakukan perubahan posisi kawat fasa guna memperbaiki impedansi transmisi.
- *Gantry* menara yaitu menara berbentuk portal digunakan pada persilangan antara dua Saluran transmisi. Tiang ini dibangun di bawah Saluran transmisi existing.
- *Combined* menara yaitu menara yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda tegangan operasinya.

Pada penjelasan diatas bisa dilihat pada tabel berikut ini yang merupakan tipe-tipe dan fungsi menara saluran transmisi 150 kV

Tabel 3.2 Tipe dan Fungsi Menara Menara SUTT 150 kV

Tipe Menara	Fungsi	Sudut
Aa	Suspension	0° – 3°
Bb	Tension/section	3° – 20°
Cc	Tension	20° – 60°
Dd	Tension	60° – 90°
Ee	Tension	> 90°
Ff	Tension	> 90°
Gg	Transposisi	

Menurut susunan/konfigurasi kawat fasa menara dikelompokkan atas.

- a. Jenis delta digunakan pada konfigurasi horisontal/mendatar.
- b. Jenis piramida digunakan pada konfigurasi vertikal/tegak.
- c. Jenis Zig-zag yaitu kawat fasa tidak berada pada satu sisi lengan menara.

3.6.1 Bagian-bagian menara

Umumnya bagian menara terdiri dari 4 bagian yaitu

1. Kerangka Menara

Kerangka menara merupakan bagian dari tiang untuk menopang peralatan-peralatan listrik yang umumnya terbuat dari besi baja, kayu atau beton yang direncanakan sedemikian rupa sehingga kuat terhadap gaya-gaya yang bekerja akibat tarikan kawat. Angin dan gaya berat dari material listrik pada kerangka menara tersebut.

2. Travers

Travers adalah bagian dari menara yang dipergunakan untuk tempat sangkutan kawat penghantar. Kekuatan gaya tarik travers disesuaikan dengan kekuatan tarikan dari tiang yang telah dihitung sedemikian rupa sehingga kuat terhadap gaya tarik kawat saluran udara.

3. Pondasi

Pondasi terdiri dari adukan beton atau susunan batu kali yang memperkuat dudukan tiang . pada umumnya menara kontruksi baja menggunakan pondasi beton. Beban pondasi menara dibatasi pada beban tekanan dan beban daya dukung.

Terdapat tiga jenis tanah dengan karakteristik sebagai berikut.

Tabel 3.3 Jenis Tanah untuk Pondasi

	Kuat/keras	Medium	Lunak
Berat tanah (kg/m ³)	1.600	1.500	1.400
Daya dukung max (kg/m ³)	60.000	40.000	20.000
Respon dari sudut	30	20	10
Type pondasi yang cocok	L	M	H

Sumber : PT.PLN (Persero) P3B

Pemikiran dasar dari desain pondasi adalah sebagai berikut :

- Stabilitas dengan respon terhadap daya dukung total berat dari daerah tanah yang menyudut dan berat pondasi sendiri harus lebih kecil dari dua kali beban daya maksimum.
- Stabilitas dengan respon terhadap beban tekanan. Total berat beban tekanan, berat pondasi sendiri dan berat tanah diatas kaki pondasi harus tidak boleh lebih satu setengah dari kapasiotas daya dukung tanah didasar bawah kaki pondasi.

Pada Tanah keras biasanya mempunyai level air tanah yang sangat rendah dan daya dukung yang tinggi. maka dapat digunakan pedoman penggunaan pondasi dilihat dari daerah tanah sebagai berikut :

Tabel 3.4 Tipe Pondasi

Type Pondasi	Daerah Tanah
L	- Tanah bergunung gunung - Hutan - Pertanian & Sawah
M	- Pertanian dekat dengan sungai - Pertanian dekat dengan sawah
H	- Sawah dekat sungai - Tanah yang sangat lembek

Volume Pondasi ditunjukkan pada tabel 3.9

Tabel 3.5 Volume Pondasi

Type Menara (150kV)	Type L (m ³)	Type M (m ³)	Type H (m ³)	Berat (kg)
AA	3,276	6,066	9,833	
BB	5,334	11,239	16,599	
CC	7,412	13,825	-	
DD	11,352	22,152	-	
Aa	2,283	3,747	5,798	4.685
Bb	3,030	6,200	10,300	5.575
Cc	4,120	7,942	12,481	6.475
Dd dan DRd	5,900	11,714	23,529	7.387/8.163

Sumber : PT.PLN (Persero) P3B

4. Sekur

Sekur adalah alat untuk memperkuat dudukan menara dan menahan gaya lentur yang terjadi pada menara akibat gaya tarik kawat-kawat SUTT.

3.6.2 Material Menara

Material menara terdiri dari SS 41 dan SS 55 untuk anggota siku standard. SS 41 dan SS 50 untuk baut dan SS50 dan SS55 untuk perpanjangan menara. Karakteristik material menara sebagai berikut:

- a. Anggota siku (tebal $\leq 16\text{mm}$)

Tabel 3.6 Karakteristik Bahan Siku Menara

	SS 41	SS55
Ukuran	Lebih kecil dari L70x6	L70x6 atau lebih
Yield Point (kg/mm ²)	25	41
Kekuatan tarik (kg/mm ²)	41	55
Intensitas kekuatan (kg/mm ²)		
-Tarikan	1.650	2.550
-Tekanan	1.650	2.770
-Lengkungan	1.650	2.770
-Geseran	950	1.450
- Tekanan penyangga	2.750	4.500

Sumber : PT.PLN (Persero) P3B

b. Baut

Berikut adalah label karakteristik bahan baut yang digunakan pada menara SUTT :

Tabel 3.7 Karakteristik Bahan Baut Manara SUTT

	SS 41	SS55	
Ukuran	M16	M20	M22
Intensitas kekuatan (kg/mm ²)			
-Geseran	2.030	3.440	4.230
-Tarikan	2.630	4.620	5.710
-Kekuatan penyangga	2.750	3.050	3.050

Sumber : PT.PLN (Persero) P3B

3.7 Rencana Pemilihan Isolator

Isolator adalah media penyekat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan. Fungsi isolator pada SUTT/SUTET adalah untuk mengisolir kawat fasa dengan menara. Pada umumnya isolator terbuat dari porselen atau kaca dan berfungsi sebagai isolasi tegangan listrik antara kawat penghantar dengan tiang. isolator yang dipergunakan pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) adalah Isolator piring yang dipergunakan untuk isolator penegang dan isolator gantung, dimana jumlah piringan isolator disesuaikan dengan tegangan sistem pada SUTT.

3.7.1 Nilai Isolasi

Besarnya isolasi pada umumnya 3 hingga 3,3 kali tegangan sistem, dimaksudkan akan tahan terhadap muka tegangan petir pada waktu 1,2 mikro detik. Apabila nilai isolasi menurun akibat dari polutan maupun kerusakan pada isolasinya, maka akan terjadi kegagalan isolasi yang akhirnya dapat menimbulkan gangguan.

3.7.2 Jenis isolator

Isolator terbagi atas beberapa jenis yaitu:

Menurut bentuknya:

- Piringan yaitu isolator yang berbentuk piring, salah satu sisi dipasang semacam mangkuk logam dan sisi lainnya dipasang pasak. Antara pasak dengan mangkuk diisolasi dengan semen khusus.

- Long rod adalah isolator yang berbentuk batang panjang, di kedua ujungnya dipasang sarana penghubung yang terbuat dari logam. Sirip-sirip isolator berada di antara kedua ujung tersebut. Isolator jenis ini dipakai sebagai isolator gantung.
- Pin isolator tidak digunakan di SUTT/SUTET.
- Post isolator adalah isolator berbentuk batang panjang, di kedua ujungnya dipasang sarana penghubung yang terbuat dari logam. Isolator ini dipakai sebagai isolator yang didudukkan.

Menurut bahannya :

Bahan isolator terbuat dari:

- Keramik: mempunyai keunggulan tidak mudah pecah, tahan terhadap cuaca, harganya relatif mahal. Pada umumnya isolator menggunakan bahan ini.
- Gelas/kaca: Mempunyai kelemahan mudah pecah namun harganya murah. Digunakan hanya untuk isolator jenis piring. Sambungan isolator yaitu batang pasak dan mangkuknya terbuat dari logam digalvanis. Pada daerah yang banyak mengandung uap garam maupun zat kimia tertentu dapat membuat batang pasak karatan dan putus. Akhirakhir ini dikembangkan teknik untuk melapisi batang pasak tersebut dengan zink

Menurut Pemasangan :

a. "I" string



Gambar 3.5 Insulator tipe *I String*

b. “V” string



Gambar 3.6 Insulator tipe *V String*

c. *Horizontal string*



Gambar 3.7 Insulator tipe *Horizontal string*

d. Single string



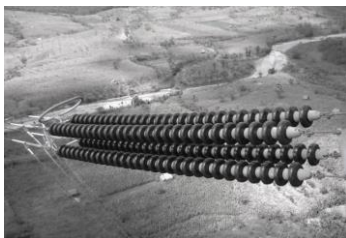
Gambar 3.8 Insulator tipe *Single String*

e. Double string



Gambar 3.9 Insulator tipe *Double String*

f. Quadruple



Gambar 3.10 Insulator tipe *Quadruple*

3.7.3 Speksifikasi isolator

Setiap isolator harus mempunyai speksifikasi dari pabrikan yang mencantumkan:

- Standar mutu, misalnya dari IEC
- Type
- Model sambungan
- Panjang creepage atau alur (mm)
- Kuat mekanik (kN)
- Panjang antar sambungan (mm)
- Berat satuan (kg)
- Diameter (mm)
- Tegangan lompatan api frekwensi rendah kondisi basah (kV)
- Tegangan lompatan impuls kondisi kering (kV)
- Tegangan tembus (kV)

3.7.4 Karakteristik listrik Isolator

Bahan Isolator yang diapit oleh oleh logam merupakan kapasitor. Kapasitansinya diperbesar oleh polutan maupun kelembaban udara dipermukaannya. Bagian ujung saluran mengalami tegangan permukaan yang paling tinggi, sehingga dibutuhkan arcing horn untuk membagi tegangan tersebut lebih merata ke beberapa piring isolator lainnya.

3.7.5 Karakteristik mekanik

Isolator harus memiliki kuat mekanik guna menanggung beban tarik kawat maupun beban berat isolator dan kawat penghantar. Umumnya mempunyai Safety faktor.

3.7.6 Tension clamp

Tension clamp adalah alat untuk memegang ujung kawat penghantar, berfungsi untuk menahan tarikan kawat di menara tension. Pemasangan tension clamp harus benar-benar sempurna agar kawat penghantar tidak terlepas. Sisi lain dari tension clamp dihubungkan dengan perlengkapan isolator. agar tidak terjadi pemanasan yang akhirnya dapat memutuskan hubungan kawat jumper.

Pada menara tension dibutuhkan kawat penghubung antara kedua ujung kawat penghantar di kedua sisi cross arm, kawat ini disebut jumper. Bagian bawah tension clamp terdapat plat berbentuk lidah untuk menghubungkan kawat jumper tersebut. Sambungan ini harus kuat dan kencang.



Gambar 3.11 Tension Clamp

3.7.7 Suspension clamp

Suspension clamp adalah alat yang dipasangkan pada kawat penghantar ke perlengkapan isolator gantung, berfungsi untuk memegang

kawat penghantar pada menara suspension. Kawat penghantar sebelum dipasang suspension clamp pada harus dilapisi armor rod agar mengurangi kelelahan bahan pada kawat akibat dari adanya vibrasi atau getaran pada kawat penghantar. Pada kondisi tertentu yaitu letak menara yang terlalu rendah dibanding menara-menara sebelahnya maka dipasang pemberat atau counter weight agar rencengan isolator tidak tertarik ke atas.

3.7.8 Sambungan (Joint)

Karena masalah transportasi, panjang konduktor dan GSW dalam satu gulungan (haspel) mengalami keterbatasan. Oleh karenanya konduktor dan GSW tersebut harus disambung, sambungan (joint) harus memenuhi beberapa persyaratan antara lain :

- Konduktivitas listrik yang baik
- Kekuatan mekanis dan ketahanan yang tangguh



Gambar 3.12 Sambungan Penghantar

3.7.9 Perentang (*Spacer*)

Spacer adalah alat perentang kawat penghantar terbuat dari bahan logam dan berengsel yang dilapisi karet. Pada SUTET spacer ini merangkap sebagai vibration damper. Fungsi spacer adalah:

- Memisahkan kawat berkas agar tidak beradu
- Pada jarak yang diinginkan dapat mengurangi bunyi desis / berisik corona Penempatan yang dipandu dari pabrikan dapat mengurangi getaran kawat



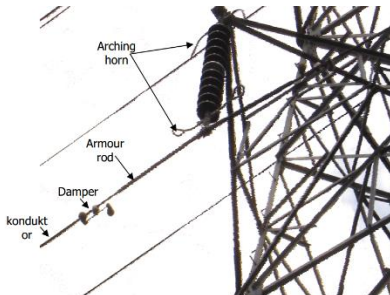
Gambar 3.13 Spacer

3.7.10 Peredam (Damper)

Damper atau vibration damper adalah alat yang dipasang pada kawat penghantar dekat menara, berfungsi untuk meredam getaran agar kawat tidak mengalami kelelahan bahan. Bentuk damper menyerupai dua buah bandul yang dapat membuang getaran kawat.

3.7.11 Batang Pelindung(Armor Rod)

Armor rod adalah alat berupa sejumlah urat kawat yang dipilin, berfungsi untuk melindungi kawat dari kelelahan bahan maupun akibat adanya kerusakan. Bahan armor rod adalah aluminium keras, sehingga dapat menjepit kawat dengan erat.



Gambar 3.14 Pemasangan Pelindung Kawat Transmisi

3.8 Rencana Kawat Pentanahan

Kawat Tanah atau Earth wire (kawat petir / kawat tanah) adalah media untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir. Kawat ini dipasang di atas kawat fasa dengan sudut perlindungan yang sekecil

mungkin, karena dianggap petir menyambar dari atas kawat. Namun jika petir menyambar dari samping maka dapat mengakibatkan kawat fasa tersambar dan dapat mengakibatkan terjadinya gangguan.

Kawat pada menara tension dipegang oleh tension clamp, sedangkan pada menara suspension dipegang oleh suspension clamp. Pada tension clamp dipasang kawat jumper yang menghubungkannya pada menara agar arus petir dapat dibuang ke tanah lewat menara. Untuk keperluan perbaikan mutu pentanahan maka dari kawat jumper ini ditambahkan kawat lagi menuju ketanah yang kemudian dihubungkan dengan kawat pentanahan.

3.8.1 Bahan Kawat Tanah

Bahan ground wire terbuat dari steel yang sudah digalvanis, maupun sudah dilapisi dengan almunium. Pada SUTET yang dibangun mulai tahun 1990an, didalam ground wire difungsikan *fibre optic* untuk keperluan telemetri, tele proteksi maupun telekomunikasi yang dikenal dengan OPGW (*Optic Ground Wire*), sehingga mempunyai beberapa fungsi.

3.8.2 Jumlah dan posisi Kawat Tanah

Jumlah Kawat Tanah paling tidak ada satu buah diatas kawat fasa, namun umumnya di setiap menara dipasang dua buah. Pemasangan yang hanya satu buah untuk dua penghantar akan membuat sudut perlindungan menjadi besar sehingga kawat fasa mudah tersambar petir. Jarak antara ground wire dengan kawat fasa di menara adalah sebesar jarak antar kawat fasa, namun pada daerah tengah gawangan dapat mencapai 120% dari jarak tersebut.

3.8.3 Pentanahan Menara

Pentanahan Menara adalah perlengkapan pembumian sistem transmisi, berfungsi untuk meneruskan arus listrik dari badan menara kebumi.

1. Nilai pentanahan menara

Nilai pentanahan menara harus dibuat sekecil mungkin agar tidak menimbulkan tegangan menara yang tinggi yang pada akhirnya dapat mengganggu sistem penyaluran:

Sistem 70kV : maksimal 5 Ohm

Sistem 150kV : maksimal 10 Ohm

Sistem 500kV : maksimal 15 Ohm

2. Jenis pentanahan

- Electroda bar: suatu rel logam yang ditanam di dalam tanah. Pentanahan ini paling sederhana dan efektif, dimana nilai tahanan tanah adalah rendah
- Electroda plat : plat logam yang ditanam di dalam tanah secara horisontal atau vertikal. Pentanahan ini umumnya untuk pengamanan terhadap petir.
- Counter poise elektroda: suatu konduktor yang digelar secara horisontal di dalam tanah. Pentanahan ini dibuat pada daerah yang nilai tahanan tanahnya tinggi. Atau untuk memperbaiki nilai tahanan pentanahan.
- Mesh elektroda: yaitu sejumlah konduktor yang digelar secara horisontal di tanah yang umumnya cocok untuk daerah kemiringan

Jenis tanah dan besar kecilnya nilai tahanan pada tanah tersebut bisa untuk menentukan jenis pentanahan kaki menara yang digunakan, bisa dilihat pada tabel 3.5 berikut ini.

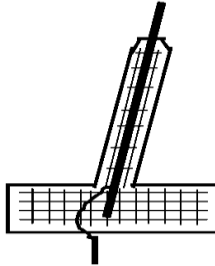
Tabel 3.8 Resistansi Jenis Tanah

Jenis Tanah	Nilai Resistansi (Ω -m)
Tanah rawa, sawah	30
Tanah liat, ladang	100
Pasir basah	200
Kerikil basah	500
Pasir atau kerikil kering	1000
Tanah berbatu	3000

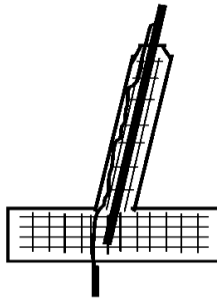
Sumber : PUIL 2000 pasal 320 – 1

3. Jenis sambungan pada tower

- Penyambungan langsung pada stub bagian bawah
- Penyambungan dibagian atas stub



Gambar 3.15 Penyambungan pada bagian bawah Stub



Gambar 3.16 Penyambungan pada bagian atas Stub

4. Komponen Pentanahan Tower

- Kawat pentanahan: terbuat dari bahan yang konduktifitasnya besar: tembaga.
- Klem pentanahan atau sepatu kabel: bahan tembaga yang tebal
- Batang pentanahan: terbuat dari pipa tembaga atau besi galvanis
- Klem sambungan kawat pentanahan terbuat dari tembaga.

BAB 4

PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI KAYAN HYDROPOWER KE LONG APARI

4.1 Konfigurasi Saluran Transmisi

Berdasarkan RUPTL PLN 2019-2028 rencana pengembangan saluran transmisi Kalimantan jalur ring dibutuhkan saluran transmisi antara Kayan Hydropower (Kaltara) ke Long Apari (Kaltim). Tegangan saluran Transmisi direncanakan 150 kV dengan panjang saluran 110 km. Untuk menentukan konfigurasi saluran transmisi dibutuhkan kemampuan hantar daya saluran transmisi. Kapasitas hantar daya transmisi untuk konduktor tunggal dengan asumsi faktor daya 0,85 adalah :

$$P_{ts} = \frac{V^2}{1000 \cdot L} \cdot k$$
$$P_{ts} = \frac{(150)^2}{1000 \cdot 110} \cdot 800 = 164 \text{ MW}$$
$$P_{ts} = \frac{164}{0,85} = 192,94 \text{ MVA / sirkuit}$$

4.2 Ukuran dan Tipe Konduktor Transmisi 150 kV

Rencana daya yang disalurkan sebesar 900 MW menggunakan vertikal ganda. Perhitungan arus dilakukan berdasarkan daya yang disalurkan, maka perhitungan arus adalah sebagai berikut :

Rating Arus :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$
$$= \frac{1058,82 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 150 \times 10^3}$$
$$= 4075,4 \text{ A per fasa}$$

Arus dengan *bundle* konduktor $n=1$

$$I_k = \frac{I}{np}$$

$$= \frac{4075,4}{1} = 4075,4 \text{ A}$$

Dengan Faktor keamanan 110% maka $I = 1,1 \times 4075,4 \text{ A} = 4482,94 \text{ A}$ karena Konduktor ACSR yang memiliki kemampuan hantar arus sebesar 4482.94 A tidak tersedia maka dipilih *bundle* yang lebih banyak

Arus untuk *bundle* konduktor dengan $n = 2$

$$I_k = \frac{I}{np}$$

$$= \frac{4075,4}{2} = 2037,7 \text{ A}$$

Karena konfigurasi jaringan yang digunakan adalah *double* sirkit maka besar arus perfasa menjadi 1018,85 A. Dengan Faktor keamanan 110% maka $I = 1,1 \times 1018,85 \text{ A} = 1120,74 \text{ A}$. karena Konduktor ACSR yang memiliki kemampuan hantar arus sebesar 1120,74 A maka berdasarkan standart SPLN 41-7 konduktor yang digunakan adalah ACSR 45/7, 650 mm² diameter 3,44 cm ($r=1,702 \text{ cm}$) dengan 2 *bundle* konduktor. Dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Ukuran dan KHA Kawat Penghantar ACSR

Size	Number / Diameter of Wire		Calculated Cross Section Area		Approx. Overall Diameter	Approx. Weight of Conductor	Calculated Breaking Load	DC Resistance at 20 °C Max.	Current Carrying Capacity *	Standard Length per Reel
	Al	GSW	Al	GSW						
mm ²	No. / mm	No. / mm	mm ²	mm ²	mm	kg/km	kN	Ohm/km	A	m
490/65	54 / 3.40	7 / 3.40	490.3	63.6	30.60	1,852	153.1	0.05896	991	2,000
493/35	43 / 3.74	7 / 3.48	472.4	66.6	32.88	1,824	121.8	0.06133	994	2,000
510/45	43 / 3.69	7 / 2.63	459.8	38.0	30.03	1,565	136.7	0.06300	955	2,000
550/70	54 / 3.60	7 / 3.60	549.7	71.3	32.40	2,076	170.6	0.05259	1,065	2,000
560/50	48 / 3.86	7 / 3.00	561.7	49.5	32.16	1,936	149.0	0.05158	1,072	2,000
570/40	45 / 4.82	7 / 2.68	821.1	39.5	36.96	2,572	136.2	0.03528	1,332	1,000
650/45	45 / 4.30	7 / 2.87	653.5	45.3	34.41	2,156	155.5	0.04420	1,176	2,000
680/83	64 / 4.00	19 / 3.40	804.2	172.5	41.00	3,230	206.3	0.03620	1,172	1,000
1043/45	72 / 4.30	7 / 2.43	1045.6	32.5	41.69	3,142	217.6	0.02831	1,521	1,000

* Note : Ambient temperature : 35°C Conductivity of Al : 61% IACS
 Wind velocity : 0.6 m/sec Solar absorption coefficient : 0.5

Standard Specification : SPLN 41-7 : 1981

Keterangan :

*) Suhu Penghantar = 90°C

4.3 Menentukan Andongan (Sag)

Andongan adalah jarak proyeksi yang diukur dari tinggi menara saluran transmisi terhadap jarak lingkungan penghantar terendah. Hal ini terjadi karena beratnya penghantar yang direntangkan antara dua tiang transmisi, dengan diketahuinya jarak andongan maka akan ditentukan tinggi menara minimum yang harus dibangun.

Dalam perhitungan andongan, faktor yang perlu diperhitungkan adalah parameter pemuaian penghantar yang disebabkan oleh kenaikan suhu penghantar. Karena pemuaian ini akan menyebabkan pertambahan panjang pada penghantar, sehingga juga akan menyebabkan pertambahan panjangnya nilai andongan dan nilai sebenarnya.

Keadaan kondisi permukaan yang tidak rata akan menyebabkan tiang menara dengan jarak tertentu mempunyai perbedaan tinggi antara satu dengan yang lainnya. Pada kondisi seperti ini diperlukan metode perhitungan yang berbeda dari perhitungan yang biasanya. Untuk standar span yang digunakan adalah sebesar 300 meter untuk SUTT 150 kV.

Tabel 4.2 Standar Span Saluran Transmisi

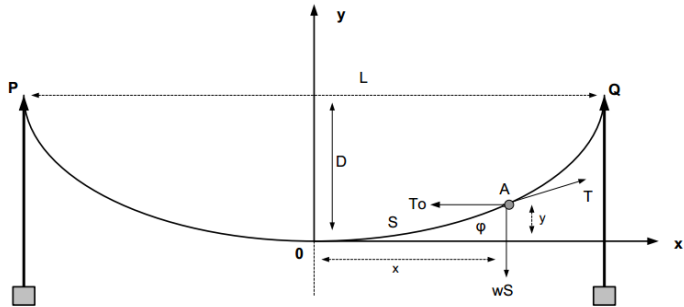
Level tegangan (kV)	Standar Span (m)
70	200-250
150	250-300
250	300-350
275	350-400
500	400-450

Data-data yang digunakan untuk menghitung andongan konduktor penghantar adalah sebagai berikut :

- Berat konduktor per satuan panjang W (kg/m), ACSR 45/7, 650 mm² beratnya = 2156 kg/km = 2,156 kg/m (SPLN 41-7:1981)
- Kuat tarik dari kawat penghantar T (kg) jenis ACSR 45/7, 650 mm²diperoleh $T = 19384$ kg (SPLN 41-7:1981)
- Panjang *span* S (meter) dari data standar *span* untuk tegangan transmisi 150kV dipilih $S = 300$ m (dilihat pada tabel 4.2)
- Koefisien ekspansi (muai panjang) konduktor α (°C) dari diperoleh untuk kawat jenis ACSR, $\alpha = 0,0000189/^\circ\text{C}$ (SPLN 41-7:1981)
- Suhu maksimum penghantar t_m) dan suhu normal t) ACSR 45/7, 650 mm² memiliki suhu $t_m = 40^\circ\text{C}$ dan $t = 20^\circ\text{C}$ (SPLN 41-7:1981)

Maka andongan saluran transmisi adalah :

a. Untuk dua menara yang tingginya sama



Gambar 4.1 Andongan dengan Tinggi Menara yang Sama

(kondisi andongan normal ; $t = 20^{\circ}\text{C}$)

Maka,

$$\begin{aligned} SAG_1 &= \frac{W \cdot S^2}{8T} \\ &= \frac{2,156 \cdot (300)^2}{8 \cdot 19384} \\ &= 1,25 \text{ m} \end{aligned}$$

(andongan maksimal ; $t_m = 40^{\circ}\text{C}$)

Maka,

$$\begin{aligned} L_0 &= S + \frac{W \cdot S^2}{24T^2} \\ &= 300 + \frac{2,156 \cdot (300)^2}{24 \cdot (19384)^2} \\ &= 300 \text{ m} \end{aligned}$$

Lalu,

$$\begin{aligned} Lt &= L_0 [1 + a(t_{max} - t)] \\ &= 300 [1 + 0,0000189(40 - 20)] \\ &= 300,11 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi,

$$\begin{aligned}SAG_2 &= \sqrt{\frac{3S(Lt - S)}{8}} \\ &= \sqrt{\frac{3.300(300,11 - 300)}{8}} \\ &= 6,7 \text{ m}\end{aligned}$$

- b. Untuk dua menara yang tingginya berbeda
Dengan asumsi beda tinggi antar menara $H = 1$ meter
(kondisi andongan normal ; $t = 20^\circ\text{C}$)
Maka,

$$\begin{aligned}D &= \frac{W.S^2}{8T} \\ &= \frac{2,156.(300)^2}{8.19384} \\ &= 1,25 \text{ m}\end{aligned}$$

Jadi,

$$\begin{aligned}SAG_1 &= D \left(1 - \frac{H}{4D}\right)^2 \\ &= 1,25 \left(1 - \frac{1}{4.1,25}\right)^2 \\ &= 0,8 \text{ m}\end{aligned}$$

(andongan maksimal ; $t_m = 40^\circ\text{C}$)
Maka,

$$\begin{aligned}
 L_o &= S + \frac{W \cdot S^2}{24 \cdot T^2} \\
 &= 300 + \frac{2,156 \cdot (300)^2}{24 \cdot (19384)^2} \\
 &= 300 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Lalu nilai besar L_t ,

$$\begin{aligned}
 L_t &= L_o [1 + a(t_{max} - t)] \\
 &= 300 [1 + 0,0000189(40 - 20)] \\
 &= 300,11 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Dan,

$$\begin{aligned}
 D_2 &= \sqrt{\frac{3S(L_t - S)}{8}} \\
 &= \sqrt{\frac{3 \cdot 300(300,11 - 300)}{8}} \\
 &= 6,7 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi,

$$\begin{aligned}
 SAG_2 &= D_2 \left(1 - \frac{H}{4 \cdot D_2} \right)^2 \\
 &= 6,7 \left(1 - \frac{1}{4 \cdot 6,7} \right)^2 \\
 &= 6,2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

4.4 Penentuan Jarak Bebas Konduktor Jaringan SUTT 150 kV (*Clearance*)

- Penentuan jarak bebas pada *bundle* konduktor ke tanah (*phase to ground clearance*) :

$$\begin{aligned}
 G_c &= 6,096 + ((V - 50) \times 0,0127) + 0,73(SAG_2 - SAG_1) \\
 &= 6,096 + ((150 - 50) \times 0,0127) + 0,73(6,2 - 0,8) \\
 &= 12 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

Jarak bebas *bundle* konduktor tiap fasa ke tanah dipengaruhi oleh ketinggian benda-benda konduktif dibawah saluran transmisi dapat dilihat pada tabel 4.2.

b. Perhitungan jarak bebas antar *bundle* konduktor :

Pada SUTT 150 kV Kayan *Hydropower*-Long Apari V_{L-L} nominal sebesar 150 kV. Perhitungan jarak bebas *bundle* konduktor dengan *bundle* konduktor lain antar fasa dapat ditentukan melalui langkah berikut ini :

- Tegangan maksimum

$$\begin{aligned}
 V_{\max} &= 1,05 \times V_{L-L} \\
 &= 1,05 \times 150 = 157,5 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

- Tegangan maksimum *line to netral crest*

$$\begin{aligned}
 V_{L-N} &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_{\max} \\
 &= 0,816 \times 157,5 = 128,5 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

- *Maximum phase to phase switching over voltage duty*

$$\begin{aligned}
 V_s &= K \times V_{L-N} \\
 &= 3 \times 128,5 = 385,5 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

- *Phase to phase over voltage duty*

$$\begin{aligned}
 V_o &= WF \times EF \times CF \times V_s \\
 &= 1,05 \times 1,05 \times 1,05 \times 385,5 \\
 &= 1214,325 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

- Jarak bebas *bundle* konduktor minimum

$$V_o = 500 \times D_p^{0,6}$$

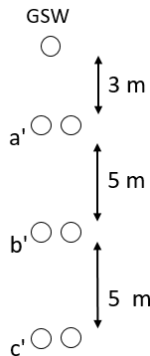
$$1214,325 = 500 \times D_p^{0,6}$$

$$D_p = 4,38 \text{ m}$$

Dengan mempertimbangkan faktor keamanan sebesar 115% maka Sehingga jarak bebas antar *bundle* konduktor adalah:

$$1,15 \times 4,38 = 5,037 \approx 5 \text{ m}$$

Jarak bebas antar *bundle* konduktor dipengaruhi juga oleh menara transmisi dan panjang isolator yang membawa konduktor penghantar. Jarak pisah antar fasa dalam satu sirkuit adalah 5 meter. maka untuk jarak antara kawat tanah dengan konduktor fasa teratas dianggap berjarak sekitar 3 meter. Berikut ini gambar jarak bebas jaringan SUTT 150kV bisa dilihat pada gambar 4.2 dibawah ini.



Gambar 4.2 Jarak Bebas Konduktor

4.5 Perhitungan Spasi Antar Sub *Bundle* Konduktor Dalam Satu Fasa

Untuk perhitungan spasi sub *bundle* konduktor dalam satu fasa dapat diperoleh dari persamaan :

$$\text{Ln} \frac{S}{\sqrt[n]{r \cdot n \left[\frac{S_0}{2 \sin(\pi/n)} \right]^{n-1}}} = \frac{S_0}{2 \cdot n \cdot r \cdot \sin \pi/n} + \frac{(n-1)}{n}$$

Dimana :

S = jarak pisah antar fasa *bundle* konduktor (m)

r = jari-jari sub *bundle* konduktor (m)

n = jumlah sub *bundle* konduktor

S₀ = spasi antar sub *bundle* konduktor (m)

Jika diketahui S = 5 m ; r = 1,7 cm = 0,01702 m ; n = 2 maka :

$$\text{Ln} \frac{5}{\sqrt[2]{0,01702 \times 2 \left[\frac{S_0}{2 \sin(\pi/2)} \right]^{2-1}}} = \frac{S_0}{2 \times 2 \times 0,01702 \times \sin \pi/2} + \frac{(2-1)}{2}$$

$$\ln \left[(5) / (0,13 S_0^{1/2}) \right] = \frac{S_0}{0,034} + 0,5$$

$$\ln(38,4 / S_0^{1/2}) = 29,41 S_0 + 0,5$$

$$3,65 - \ln S_0^{1/2} = 29,41 S_0 + 0,5$$

$$\ln S_0^{1/2} + 29,41 S_0 - 3,15 = 0$$

Misalkan $S_0^{1/2} = \varepsilon^x$; sehingga : $S_0 = \varepsilon^{(2/1)x}$

Bila $y = (2/1)x$; maka : $S_0 = \varepsilon^y$

$$f(y) = \ln(\varepsilon^x) + 29,41 \varepsilon^y - 3,15$$

$$f(y) = x + 29,41 \varepsilon^y - 3,15$$

$$f(y) = \frac{1}{2} y + 29,41 \varepsilon^y - 3,15$$

$$f(y) = y + 58,42 \varepsilon^y - 6,3$$

Maka,

$$f(y) = y + 58,42 \varepsilon^y - 6,3$$

&

$$f'(y) = 1 + 58,42 \varepsilon^y$$

Melalui metode literasi Newton Rhapson dapat diperoleh :

$$y_{n+1} = y_n - \frac{f(y_n)}{f'(y_n)}$$

Pada literasi pertama ($n = 0$) dengan harga awal $y = -0,5$ maka:

$$f(-0,5) = -0,5 + 58,42 \varepsilon^{-0,5} - 6,3 = 28,6335$$

$$f'(-0,5) = 1 + 58,42 \varepsilon^{-0,5} = 36,4335$$

$$y_1 = -0,5 - \frac{28,6335}{36,4335} = -1,2859$$

Pada literasi kedua ($n = 1$) dengan harga $y = -1,2859$ maka :

$$f(-1,2859) = -1,2859 + 58,42 \varepsilon^{-1,2859} - 6,3 = 8,5614$$

$$f'(-1,2859) = 1 + 58,42 \varepsilon^{-1,2859} = 17,1473$$

$$y_2 = -1,2859 - \frac{8,5614}{17,1473} = -1,7851$$

Pada literasi ketiga ($n = 2$) dengan harga $y = -1,7851$ maka :

$$f(-1,7851) = -1,7851 + 58,42 \varepsilon^{-1,7851} - 6,3 = 1,7166$$

$$f'(-1,7851) = 1 + 58,42 \varepsilon^{-1,7851} = 10,8017$$

$$y_3 = -1,7851 - \frac{1,7166}{10,8017} = -1,9440$$

Pada literasi keempat ($n = 3$) dengan harga $y = -1,9440$ maka :

$$f(-1,9440) = -1,9440 + 58,42 \varepsilon^{-1,9440} - 6,3 = 0.1176$$

$$f'(-1,9440) = 1 + 58,42 \varepsilon^{-1,9440} = 9,3616$$

$$y_3 = -1,9440 - \frac{0.1176}{9,3616} = -1,9565$$

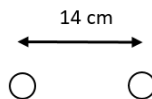
Pada iterasi kelima ($n = 4$) dengan harga $y = -1,9565$ maka :

$$f(-1,9565) = -1,9565 + 58,42 \varepsilon^{-1,9565} - 6,3 = 0.001$$

$$f'(-1,9565) = 1 + 58,42 \varepsilon^{-1,9565} = 9,2578$$

$$y_4 = -1,9565 - \frac{0,001}{9,2578} = -1,9565$$

Berdasarkan perhitungan diatas nilai tersebut merupakan hasil perhitungan literasi yang terakhir. Sehingga jarak antar sub *bundle* konduktor hasilnya diperoleh : $S_0 = \varepsilon^y = \varepsilon^{-1,9565} = 0,14 \text{ m} = 14 \text{ cm}$
Berikut ini gambar 4.2 merupakan gambar jarak antar sub *bundle* konduktor.



Gambar 4.3 Jarak antara Konduktor Satu *Bundle* dalam Satu Fasa

4.6 Perhitungan Jari-jari Ekvivalen *Bundle* Konduktor ($R_{eq} = \text{GMR}$)

Berdasarkan persamaan yang ada maka dapat dihitung nilai dari jari-jari ekuivalen setiap *bundle* konduktor untuk 2 sub *bundle* konduktor adalah sebagai berikut :

$$R_{eq} = (2 \cdot r \cdot R)^{1/2} = (2 \times 1,7 \times (7))^{1/2} = 5 \text{ cm}$$

4.7 Perhitungan GMD

Berdasarkan Perhitungan sebelumnya, maka dapat diketahui jarak antar *bundle* konduktor saluran transmisi sirkit vertikal ganda adalah :

- Jarak (S) a-b, b-c, a'-b', b'-c' = 5 m
- Jarak (S) a-c, a'-c' = 10 m
- Jarak (S) a-b', b-a', b-c', c-b' = $\sqrt{10^2 + 5^2} = 11,2 \text{ m}$
- Jarak (S) a-c', c-a' = $\sqrt{10^2 + 10^2} = 14,14 \text{ m}$

Maka nilai GMD adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{GMD} &= \sqrt[12]{S_{ab} S_{bc} S_{ac} S_{a'b'} S_{b'c'} S_{a'c'} S_{ab'} S_{ac'} S_{ba'} S_{bc'} S_{cb'} S_{ca'}} \\ \text{GMD} &= \sqrt[12]{(5)(5)(10)(5)(5)(10)(11,2)(14,14)(11,2)(11,2)(11,2)(14,14)} \\ \text{GMD} &= 8,7 \text{ m} \end{aligned}$$

4.8 Perhitungan Resistansi *Bundle* Konduktor

Luas penampang konduktor ACSR yang digunakan mempunyai luas serat sebesar 650 mm², dengan susunan 45AL / 7St dengan asumsi arus hanya mengalir pada serat aluminium (n = 45 serat). Maka, Luas serat aluminium : 650 mm²/45 = 14,4 mm² = 14,4 × 10⁻⁶ m²

Luas lingkaran = $\pi \cdot r^2$, sehingga :

$$r = \sqrt{\frac{14,4 \times 10^{-6}}{\pi}} = 2,14 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,21 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

Resistivitas aluminium = $\rho = 2,7 \times 10^{-9} \text{ } \Omega \text{m}$, pada suhu 20°C

Koefisien muai panjang $a = 0,0000189 / ^\circ \text{C}$, pada suhu 20°C

Melalui persamaan berikut maka resistansi *bundle* konduktor adalah :
 Pada suhu 20°C,

$$R_{20^{\circ}C} = \frac{1,337 \cdot \rho \cdot L}{r^2 \cdot n}$$

$$R_{20^{\circ}C} = \frac{1,337 \times 2,7 \times 10^{-9} \times 110 \times 10^3}{(0,21 \times 10^{-2})^2 \times 45}$$

$$R_{20^{\circ}C} = 0,002 \Omega/\text{km}$$

Pada suhu 40°C,

$$R_{40^{\circ}C} = R_{20^{\circ}C} \times (1 + a(t_2 - t_1))$$

$$R_{40^{\circ}C} = 0,002 \times (1 + 0,0000189(40 - 20))$$

$$R_{40^{\circ}C} = 0,002 \Omega/\text{km}$$

4.9 Rugi Daya Saluran Transmisi

Karena besarnya $R_{40^{\circ}C}$ sudah diketahui maka rugi daya pada saluran transmisi dapat diperoleh menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$R_i = 3 \cdot n \cdot (I_k)^2 \cdot R$$

$$R_i = 3 \times 2 \times (1018,85)^2 \times 0,002$$

$$R_i = 12456 \text{ W/km} = 12,45 \text{ kW/km}$$

4.10 Gradien Tegangan Permukaan Konduktor Maksimum

Dalam melakukan perencanaan saluran transmisi perlu melakukan perhitungan gradien tegangan permukaan kawat saluran transmisi dengan memperhatikan masalah tegangan tembus udara. Penggunaan konduktor saluran transmisi gradien tegangan permukaan konduktor maksimal harus dibawah tahanan isolasi udara adalah 30 kV/cm.

Untuk *bundle* konduktor ($n = 2$) diperoleh data sebagai berikut :

- R = $0,14/\sqrt{2} = 0,1 \text{ m}$
- GMD = 8,7 m
- $r = 1,7 \text{ cm} = 0,01702 \text{ m}$
- $V_{L-L,MAX} = 157,5 \text{ kV}$
- $n (\text{bundle}) = 2$
- $R_{eq} = 14,38 \text{ cm} = 0,14 \text{ m}$

Ketinggian fasa terbawah adalah 13,5 m, sedangkan jarak bebas antara fasa terbawah ke tanah adalah 12 m. Jarak minimal ketinggian konduktor fasa ke tanah didapat dari penjumlahan ketinggian fasa terbawah dengan jarak bebas antara fasa terbawah ke tanah maka didapat 25,5 m. Berikut ini perhitungan tegangan maksimum permukaan konduktor :

- a. Gradien tegangan permukaan *bundle* konduktor maksimum yang merupakan fasa terbawah ($H = 25,5$ m)

$$E_{oa} = \frac{(1+(n-1)r/R)V}{n.r.\ln \frac{2H}{\text{Re } q^4 \sqrt{\left(1+(2H/Deq)^2\right)\left(1+(H/Deq)^2\right)}}$$

$$E_{oa} = \frac{(1+(2-1)0,01702/0,19)157,5}{4 \times 0,01702 \times \ln \frac{2 \times 25,5}{0,14^4 \times \sqrt{\left(1+(2 \times 25,5/8,7)^2\right)\left(1+(25,5/8,7)^2\right)}}$$

$$E_{oa} = 330,54 \text{ kV/m} = 3,3 \text{ kV/cm}$$

- b. Konduktor b pada ketinggian ($H = 30,5$) dari tanah, gradien tegangan permukaan *bundle* konduktor maksimum pada fasa yang tengah adalah :

$$E_{ob} = \frac{(1+(n-1)r/R)V}{n.r.\ln \frac{2H}{\text{Re } q^2 \sqrt{\left(1+(2H/Deq)^2\right)}}$$

$$E_{ob} = \frac{(1+(2-1)0,01702/0,19)157,5}{4 \times 0,01702 \times \ln \frac{2 \times 30,5}{0,14^2 \times \sqrt{\left(1+(2 \times 30,5/8,7)^2\right)}}$$

$$E_{ob} = 483,63 \text{ kV/m} = 4,8 \text{ kV/cm}$$

- c. Konduktor c pada ketinggian ($H = 35,5$) dari tanah, gradien tegangan permukaan *bundle* conductor maksimum pada fasa yang teratas adalah :

$$E_{oc} = \frac{(1+(n-1)r/R)V}{n.r.\ln \frac{2H}{Re q^4 \sqrt{\left(1+(2H/Deq)^2\right)\left(1+(H/Deq)^2\right)}}}$$

$$E_{oc} = \frac{(1+(2-1)0,01702/0,19)157,5}{4 \times 0,01702 \times \ln \frac{2 \times 35,5}{0,14^4 \times \sqrt{\left(1+(2 \times 35,5/8,7)^2\right)\left(1+(35,5/8,7)^2\right)}}}$$

$$E_{oc} = 341,89 \text{ kV/m} = 3,4 \text{ kV/cm}$$

Tegangan permukaan kawat *bundle* konduktor nilainya yang terbesar yaitu 4,8 kV/cm, dan masih dibawah tegangan tembus udara yaitu 30 kV/cm.

4.11 Tegangan Disruptive Kritis

Tegangan disruptive kritis dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$E_0 = 2110.\delta.m_o.Re q.\ln.\left(D_{eq}/R_{eq}\right) \text{ kV / Fasa}$$

Maka dapat dihitung faktor kerapatan relative udara δ sebagai berikut, pada suhu 25°C (cuaca cerah) dengan tekanan atmosfer 76 cmHg.

$$\delta = \frac{3,9211p}{273+t}$$

$$\delta = \frac{3,9211 \times 76}{273+25} = 1 \text{ cmHg/}^\circ\text{C}$$

Karena yang digunakan $n = 2$, maka tegangan disruptive pada cuaca cerah dengan 2 sub *bundle* conductor dengan faktor permukaan konduktor (m_o) = 0,9 (untuk perencanaan), $Re q = 0,05$ m, dan $Deq = 8,7$ m adalah

$$E_0 = V_o \cdot \delta \cdot m_o \cdot r_{eq} \cdot \ln(D_{eq} / R_{eq}) \text{ kV/fasa}$$

$$E_0 = 2110 \times 1 \times 0,9 \times 0,05 \times \ln\left(\frac{8,7}{0,05}\right)$$

$$E_0 = 489,85 \text{ kV/fasa}$$

4.12 Rugi Daya Korona

Berdasarkan persamaan matematis rugi daya korona pada tiap fasa *bundle* konduktor dapat dihitung sebagai berikut :

$$P_c = \frac{0,000111}{\left(\ln \frac{2S}{d}\right)^2} f \cdot V^2 \cdot F$$

Karena yang digunakan adalah 4 sub *bundle* konduktor, maka rugi daya korona dengan 2 sub *bundle* konduktor ($n = 2$) dapat diperoleh sebagai berikut :

Dengan $F = 0,05$ (tabel 2.6) dan $f = 50$ Hz, maka :

$$P_c = \frac{0,000111}{\left(\ln \frac{2 \times 5}{0,0334}\right)^2} \times 50 \times (150/\sqrt{3})^2 \times 0,05$$

$$P_c = 6,46 \text{ kW/km tiap fasa}$$

Rugi daya korona total pada ketiga fasanya adalah $3 \times 6,46 = 19,38 \text{ kW/km}$. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya maka dapat dianalisa untuk tegangan disruptive kritis konduktor dengan memperhatikan hal sebagai berikut :

- Tegangan disruptive kritis konduktor merupakan tegangan kritis dimana gejala korona terjadi pada konduktor. Sehingga, untuk penggunaan konduktor pada saluran transmisi, untuk mengurangi terjadinya efek korona tegangan disruptive kritis diusahakan diatas tegangan kerja konduktor (150 kV /fasa).
- Tegangan tembus udara yaitu tegangan yang menyebabkan gagalnya gaya dielektrik udara, Pada penggunaan konduktor transmisi, gradien tegangan permukaan konduktor **harus dibawah** dari tegangan tembus udara.

Berdasarkan perhitungan 2 point diatas beserta data yang telah dihitung sebelumnya maka dapat disimpulkan :

- Untuk $n=2$ *bundle* konduktor, memenuhi persyaratan karena tegangan disruptive kritis > tegangan kerja konduktor, dan gradien tegangan permukaan < tegangan tembus udara.

Sehingga dalam perencanaan transmisi ini digunakan 2 *bundle* konduktor.

4.13 Perencanaan Konduktor Saluran Transmisi 150 kV Kayan-Long Apari

Sebagai kesimpulan dari perhitungan yang telah dilakukan, maka dapat diusulkan, untuk konduktornya menggunakan sistem *bundle* konduktor, dan data perhitungan yang diperoleh adalah sebagai berikut :

Tabel 4.3 Perencanaan Pemilihan Konduktor

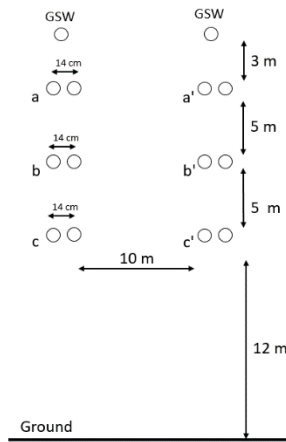
Keterangan	Ukuran
Jenis Sirkuit	Vertikal Ganda
Kapasitas sirkuit	192,94 MVA/sirkuit
Jenis <i>bundle</i> konduktor	ACSR
Ukuran <i>bundle</i> konduktor	650 mm ²
Diameter <i>bundle</i> konduktor	3,34 cm
Nomor konduktor	45/7
Kuat hantar arus	1176 A
Jumlah sub <i>bundle</i> konduktor	4 <i>bundle</i>
Jarak normal antar menara	300 m
Jarak normal andongan	1,25 m
Jarak bebas minimal fasa ground (<i>clearance</i>)	12 m
Jarak bebas minimal fasa-fasa	5 m
Jarak rentang konduktor dalam satu menara	10 m
Spasi antar sub <i>bundle</i> konduktor	26 cm
Jari-jari ekuivalen (Req)	5 cm
Diameter ekuivalen (Deq)	8,7 m
Resitansi total <i>bundle</i> konduktor	0,002 Ω /km
Rugi tahanan <i>bundle</i> konduktor	12,45 kW/km
Gradien tegangan permukaan maksimum	4,8 kV/cm
Tegangan disruptive kritis konduktor	1097,85 kV/fasa
Rugi akibat korona	19,38 kW/km

Dengan mempertimbangkan hasil yang telah diperoleh, maka dapat disimpulkan bahwa untuk empat sub *bundle* conductor ($n = 4$),

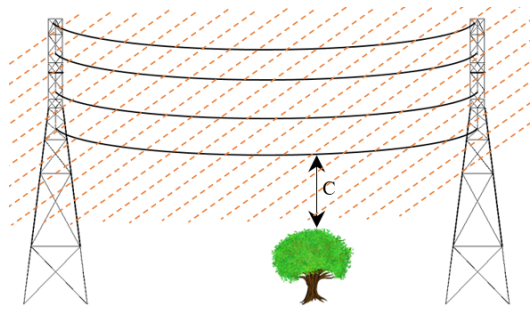
memenuhi persyaratan, karena hasil perhitungan tegangan *disruptive* kritis lebih dari level tegangan kerja konduktor.

Dan hasil perhitungan gradien tegangan permukaan konduktor kurang dari nilai tegangan tembus udara. Sehingga dalam perencanaan saluran transmisi ini menggunakan *bundle* konduktor dengan 2 sub *bundle* konduktor.

Berikut ini perencanaan konfigurasi konduktor dari hasil perhitungan bisa dilihat pada gambar 4.4



Gambar 4.4 Konfigurasi Konduktor Hasil Perhitungan



Gambar 4.5 Ruang Bebas Minimum

Dalam perhitungan diambil jarak bebas minimum paling besar untuk menjaga tingkat keamanan, Jarak *clearance* konduktor dengan benda dibawahnya akan bertambah jika melewati daerah-daerah seperti yang disebutkan pada tabel 4.2 dibawah berikut ini,.

Tabel 4.2 Jarak Bebas Minimum Antara Konduktor SUTT 150 kV dengan Benda Lain

No	Lokasi	SUTT 150 kV (m)
1	Lapangan terbuka	8
2	Daerah dengan keadaan tertentu	
2.1	Bangunan tidak tahan api	13,5
2.2	Bangunan tahan api	4
2.3	Lalu lintas jalan atau jalan raya	9
2.4	Pohon-pohon pada umumnya, hutan, perkebunan	5
2.5	Lapangan olahraga	13,5
2.6	SUTT lainnya, penghantar udara tegangan rendah, jaringan telkom antena radio, antena televisi, dan kereta gantung	4
2.7	Rel kereta biasa	9
2.8	Jembatan besi, rangka besi, penahan penghantar, kereta listrik terdekat	4
2.9	Titik tertinggi tiang kapal pada kedudukan air pasang atau tertinggi pada lalu lintas air	4

4.14 Perhitungan Tegangan *Flashover* Kritis dan Surja *Switching*

Dalam perencanaan saluran transmisi sebelum menentukan isolator yang akan digunakan perlu dilakukan perhitungan sebagai berikut:

- a. Tegangan *flashover* kritis (V_{CFO}), dan surja *switching* (V_w) dengan persamaan sebagai berikut :
 - Perkiraan kenaikan tegangan yang diijinkan adalah sebesar 5% dari tegangan nominal (150 kV), sehingga :

$$V_{\max} = 1,05 \times V_{L-L} \text{ (kV)}$$

$$V_{\max} = 1,05 \times 150 = 157,5 \text{ kV}$$

- Tegangan maksimum fasa ke netral :

$$V_{L-N} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{\max} = 0,82 \times V_{\max} \text{ (kV)}$$

$$V_{L-N} = 0,82 \times 157,5 = 129,15 \text{ kV}$$

- Tegangan Withstand *switching surge crest* V_w :

$$V_w = k \cdot V_{L-N} \text{ (kV)}$$

$$V_w = 2,5 \times 129,15 = 322,88 \text{ kV}$$

- Tegangan *critical flashover* V_{CFO} :

$$V_{CFO} = WF \times EF \times CF \times V_w \text{ (kV)}$$

$$V_{CFO} = 1,05 \times 1,05 \times 1,05 \times 322,88 = 1017 \text{ kV}$$

Setelah melakukan perhitungan V_{CFO} dan V_w , maka dapat dilakukan perencanaan isolasi dengan memanfaatkan data yang sudah ada.

- Data masukan berupa :
 - Tegangan saluran transmisi sebesar 150 kV
 - Konfigurasi yang digunakan adalah vertikal ganda
 - Tipe isolator yang akan digunakan adalah isolator dengan konfigurasi *string* tipe *double suspension*, dengan pertimbangan bahwa isolator konfigurasi *string* tipe *double suspension* memiliki kelebihan yaitu resistansi lebih besar bila dibanding dengan isolator *string* tipe *single suspension*.
- Penentuan tegangan *flashover lightning* dan tegangan *flashover switching* telah diperoleh dari perhitungan diatas yaitu :
 - Tegangan *critical flashover* V_{CFO} : 1017 kV
 - Tegangan Withstand (V_w) : 322,88 kV
- Perhitungan koefisien keamanan (k_1 dan k_2)
Kemudian dihitung koefisien keamanan dengan langkah-langkah, dan data masukan sebagai berikut :
 - Tegangan saluran transmisi sebesar 150 kV

- Tipe *string* dipilih berbentuk *double suspension*, maka CR = 13%
- Tingkat kontaminasi (ktm) = 20% (asumsi tingkat kontaminasi kategori medium, karena dilihat dari kondisi dibangunnya saluran transmisi ini) seperti yang tertera pada tabel 4.4 dibawah ini,

Tabel 4.4 Tingkat Kontaminasi

Kategori Kontaminasi	Lapisan garam (mg/cm ²)	% Penurunan Kekuatan Isolator
Ringan	0,03 – 0,06	10%
Medium	0,1 – 0,2	20%
Berat	0,3 – 0,6	35%
Sangat berat	> 0,6	60%

Penentuan presentasi penurunan kekuatan isolator ditentukan berdasarkan cuaca yang ada di Indonesia, yaitu cerah atau hujan. (tabel 4.5). Untuk penyimpangan standarnya kali ini dipilih cuaca hujan (Ps = 5%)..

Tabel 4.5 Kondisi Cuaca (Hu)

Kondisi Cuaca (Hu)	(Hu)
Cerah	0 %
Hujan	5 %

Dengan data-data yang telah tersedia, maka dapat dihitung :
Koefisien keamanan fasa tengah (k₁) :

$$k_1 = CR + ktm + hu + Ps$$

$$k_1 = 13\% + 20\% + 0\% + 5\% = 38\% = 0,38$$

Koefisien keamanan fasa pinggir (k₂)

Koefisien fasa pinggir untuk konfigurasi *string double* adalah :

$$k_2 = k_1 - 0,05$$

$$k_2 = 0,38 - 0,05 = 0,33$$

- e. Untuk konfigurasi saluran transmisi yang dipilih yaitu konfigurasi vertikal ganda, maka :
- Perhitungan tegangan *flashover* fasa pinggir akibat *lighting* :

$$V_{FLPL} = (1 + k_2) V_{CFO}$$

$$V_{FLPL} = (1 + 0,33) \times 1017 = 1352,6 \text{ kV}$$

- Perhitungan tegangan *flashover* fasa pinggir akibat *switching* :

$$V_{FLPS} = (1 + k_2) \times V_w$$

$$V_{FLPS} = (1 + 0,33) \times 322,88 = 429,43 \text{ kV}$$

- f. Perhitungan jumlah isolator dan jarak sambaran

Untuk tegangan sistem nominal 150 kV pada tabel 4.6. Didapatkan tegangan lebih akibat *switching* sebesar 566 kV dan *power frekuensi overvoltage* sebesar 261 kV direkomendasikan menggunakan 8 renteng isolator, untuk faktor keamanan maka digunakan 11 renteng isolator.

Perhitungan jumlah isolator optimal digunakan untuk menentukan jumlah isolator pada tiap-tiap menara yang mampu menahan tegangan lebih *switching* dan *lightning* pada daerah tertentu

Tabel 4.6 Rekomendasi Jumlah Isolasi SUTT 150 kV

Tegangan sistem (kV)	Teg. P-N (kV)	V _{FLPS} (kV)	JIS (bh)	PFO (kV)	JIS (bh)	Jumlah Isolator (bh)	
						Rekomen-dasi	Digunakan
132	76	495	5	228	6	7	9/10
150	87	566	6	261	7	8	10/11
220	127	825	9	381	10	11	15/16
400	231	1155	13	762	20	22	24
500	289	1445	17	954	25	30	34

*)PFO = Power Frekuensi Overvoltage

Untuk konfigurasi vertikal maka :

Penentuan jumlah isolator yang digunakan mengacu pada standart SPLN didapatkan jumlah isolator (jis) = 11 buah pada tabel 4.5 maka dipilih isolator type normal (type A) dengan panjang rangkaian isolator (D) maka:

Tabel 4.7 Data Isolator Menurut Standart SPLN

Kelas tegangan	150 kV
Tipe Isolator	Isolator gantung tipe normal (<i>type A</i>). <i>Type of ball & socket coupling</i> : IEC 20 mm AU 160 BS
<i>Creepage distance</i> (mm)	292 (min)
Diameter (mm)	254
Tinggi (mm)	146
<i>Electro mechanical failing load</i> (KN)	120
<i>Dry lightning impuls Withstand voltage</i> (kV)	100
<i>Wet power frequency Withstand voltage</i> (kV)	40
<i>Power frequency puncture</i> (kV)	110
	<i>Mark on porcelain</i> : 160 kN

Dari tabel spesifikasi isolator diatas diketahui bahwa tinggi isolator adalah 146 mm. sehingga panjang rangkaian isolator (D) adalah :

$$D(i) = I(i) \times Jis(i)$$
$$D = 146 \times 11 = 1606 \text{ mm}$$

Isolator berkonfigurasi *double suspension* jumlah isolatornya adalah

$$jis' = 2 \times jis = 2 \times 11 = 22 \text{ buah}$$

Untuk mencari jarak sambaran ditentukan dengan mengetahui harga kerapatan udara dengan asumsi sepanjang jalur homogen dan kondisi cuaca cerah dengan suhu 35°C dan kelembaban udara 60% yaitu :

$$SFP = D \times Hs \times \delta$$
$$SFP = 1,46 \times 60\% \times 0,96 = 0,84 \text{ meter}$$

Sedangkan untuk *gap arcing horn* (busur api) fasa pinggir direncanakan yaitu :

$$GFP = \frac{SFP - 0,021}{1,115}$$

$$GFP = \frac{0,84 - 0,021}{1,115} = 0,73 \text{ m}$$

4.15 Perencanaan Isolator Saluran transmisi 150 kV

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan untuk merencanakan isolator transmisi 150 kV, maka dapat disusun hasil perencanaan isolator yang digunakan pada tabel 4.8 berikut ini,

Tabel 4.8 Perencanaan Isolator Saluran Transmisi 150 kV

Uraian	Tegangan Sistem 150 kV
Konfigurasi Saluran	Vertikal ganda
Tipe isolator	Isolator Gantung Tipe Normal (<i>type A</i>) <i>Type of ball & socket coupling</i> IEC 20 mm AU 160 BS
Tegangan <i>flashover lightning</i> (V_{CFO})	1017 kV
Tegangan <i>flashover switching</i> (v_w)	322,88 kV
Tegangan <i>flashover</i> fasa pinggir akibat <i>lightning</i> (V_{FLPL})	1352,6 kV
Tegangan <i>flashover</i> fasa pinggir akibat <i>switching</i> (V_{FLPS})	429,43 kV
Panjang rangkaian isolator (D)	1,606 meter
Jumlah isolator konfigurasi (jis)	2 x 11 buah
Jarak sambaran	0,84 meter
<i>Gap arcing horn</i>	0,73 meter

4.16 Penentuan Outline Menara SUTT 150 kV

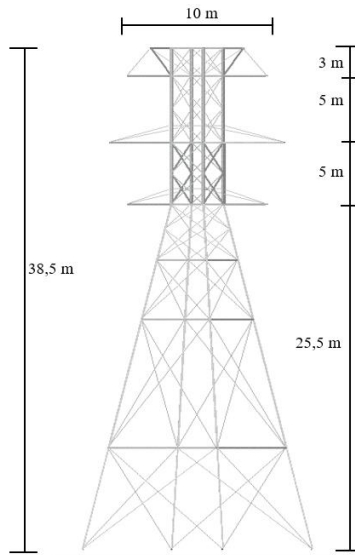
Desain menara transmisi yang digunakan sebagai tempat isolator dan konduktor didasarkan pada hasil perhitungan konfigurasi konduktor dan pemilihan isolator. Jarak antar menara untuk SUTT 150 kV Kayan *Hydropower* - Long Apari sepanjang ± 110 kms mengacu pada standar yang ada yaitu digunakan rata-rata sebesar 300 m seperti yang tertera pada tabel 4.2. Sehingga didapat perhitungan jumlah menara yang dibutuhkan sebagai berikut :

$$\text{Jumlah tower} = \frac{110 \text{ km}}{300 \text{ meter}} = 367 \text{ tower}$$

Pemilihan menara yang digunakan pada saluran transmisi mengacu pada jalur yang dilewati saluran transmisi. Berikut ini adalah menara yang dipilih untuk berbagai jenis sudut jalur yang dilewati :

- Untuk sudut belokan $< 2^\circ$ digunakan menara SUTT tipe A
- Untuk sudut belokan $< 20^\circ$ digunakan menara SUTT tipe B
- Untuk sudut belokan $> 45^\circ$ digunakan menara SUTT tipe C

Jarak antara konduktor fasa yang paling bawah dengan tanah nilainya diperoleh dari penjumlahan antara nilai *ground clearance* hasil perhitungan dengan batas minimum benda dibawah saluran transmisi yang nilainya diambil yang paling besar yaitu $12 + 13,5 = 25,5$ meter. Berikut ini gambar 4.6 yang merupakan gambar konstruksi menara suspension.



Gambar 4.6 Gambar Menara Suspension

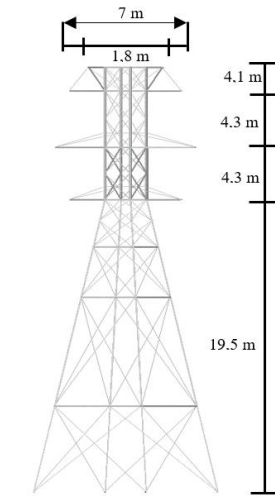
Sedangkan menara tension digunakan pada sudut belokan yang besar untuk menahan beban bila ada putusnya konduktor maupun *ground wire*. Berikut adalah ukuran standar menara transmisi yang digunakan.

Tabel 4.9 Ukuran Standar Menara Transmisi

Tipe Menara	Tinggi (m)	Lebar Kaki (m)	Jarak Antar Travers (m)	Jarak Travers Ground Wire (m)
AA	33,8	5,54	4,7	2,9
BB	32,8	5,58	4,3	4,1
CC	32,2	5,58	4,3	4,1
DD &DDR	32,2	5,58	4,3	4,1

Sumber : PT.PLN (persero (P3B))

Berikut adalah gambar konstruksi menara transmisi tension tipe

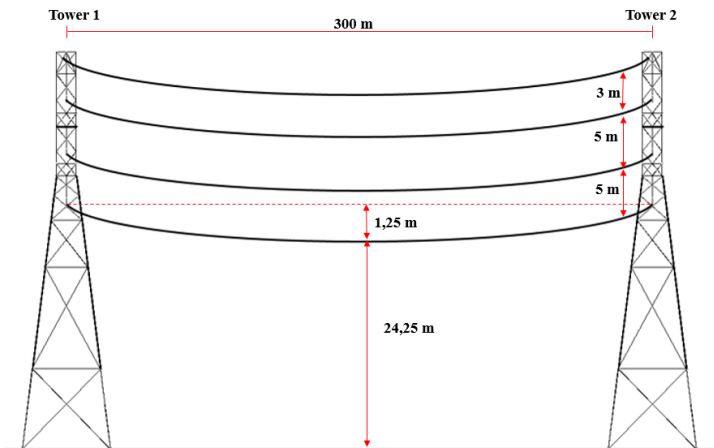


Gambar 4.7 Menara Tension Transmisi

Tinggi menara standar dapat berubah menyesuaikan daerah yang dilewati saluran transmisi. Dengan berubahnya tinggi menara, maka berat menara juga akan berubah. Berikut ini tabel 4.10 yang menunjukkan perubahan tinggi menara dan perubahan berat menara.

Tabel 4.10 Berat Menara Standar dan Perubahannya

Tipe double zebra		Berat (kg)
AA6	-3 m	6.924,47
AA6	0 m	7.538,27
AA6	3 m	8.194,19
AA6	6 m	8.878,04
AA6	9 m	9.744,09
AA6	12 m	11.140,29
AA6	15 m	
BB6	-3 m	9.041,86
BB6	0 m	9.848,55
BB6	3 m	11.122,98
BB6	6 m	11.966,89
BB6	9 m	13.336,56
BB6	12 m	14.906,48
BB6	15 m	
CC6	-3 m	
CC6	0 m	11.601,13
CC6	3 m	13.301,34
CC6	6 m	15.130,19
CC6	9 m	
CC6	12 m	20.558,02
CC6	15 m	
DD6	-3 m	
DD6	0 m	17.474,68
DD6	3 m	18.720,56
DD6	6 m	21.312,78
DD6	9 m	22.887,34
DD6	12 m	
DD6	15 m	27.775,97
DDR6	-3 m	
DDR6	0 m	18.379,82
DDR6	3 m	19.625,27
DDR6	6 m	22.209,27
DDR6	9 m	23.792,47
DDR6	12 m	
DDR6	15 m	28.672,46



Gambar 4.8 Desain Saluran Transmisi 150 kV

4.17 Pentanahan Kaki Menara

Parameter yang ditekankan adalah tahanan pentanahan karena parameter ini sangat menentukan perlindungan pada saluran transmisi. pada titik terdekat menara tersebut, Parameter ini akan menjamin saluran yang memadai bagi arus sambaran petir untuk diredam oleh tanah, melalui menara.

Nilai tahanan kaki menara dipengaruhi oleh tahanan gabungan kaki menara dan tahanan pentanahan menara sistem transmisi karena terhubung oleh kawat tanah, begitu juga parameter tahanan bersama yaitu tahanan sistem yang diukur setelah kaki menara dan piranti pentanahan dihubungkan.

Parameter tahanan pentanahan sangat menentukan kualitas sistem pentanahan kaki menara, karena tidak akan mungkin diperoleh tahanan menara dan tahanan bersama yang rendah ketika seluruh tahanan pentanahan bernilai tinggi. Arus petir akan langsung mengalir ke tanah melalui menara tersebut.

Tabel 4.7 Tahanan Jenis Tanah

No.	Jenis Tanah	Nilai Resistansi (Ω -m)
1.	Tanah rawa, sawah	30
2.	Tanah liat, ladang	100
3.	Pasir basah	200
4.	Kerikil basah	500
5.	Pasir atau kerikil kering	1000
6.	Tanah berbatu	3000

Tahanan kaki harus bernilai rendah, karna seiring berjalan waktu terjadi perubahan struktur tanah, perubahan kelembaban dan perubahan tingkat kandungan air mengakibatkan tingginya resistivitas tanah. Kondisi ini akan semakin buruk ketika musim kemarau panjang.

Pada perencanaan SUTT kali ini dipilih tahanan berbentuk elektrode batang yang ditanam tegak lurus di dalam tanah atau juga bisa menggunakan elektrode batang berselubung pipa galvanis. Sebelum dilakukan pemasangan elektroda batang, harus terlebih dahulu ditentukan desain dari elektroda batang, lalu dihitung nilai tahanan elektroda batang sesuai standart yaitu harus dibawah 5 Ω (ohm) untuk elektroda batang tunggal. Adapun desain dan perhitungan nilai tahanan berdasarkan standart adalah sebagai berikut:

- Panjang elektrode (L) = 5,5 m
- Diameter elektroda (D) = 2,54 cm
- Jari-jari elektrode (r) = 1,27 cm

Pentanahan kaki menara Berdasarkan standar PT PLN (Persero), dipasang pada setiap menara dengan jumlah pentanahan 4 buah setiap menara. Bila tahanan pentanahan masih lebih besar dari 5 ohm, maka diusahakan dengan pentanahan *counterpoise* . untuk mengetahui besar nilai pentanahan maka dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

Untuk tanah rawa /sawah, maka :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times a^3 \times r}} \right)$$
$$R = \frac{30}{2\pi \times 5,5} \times \left(\ln \frac{2 \times 5,5}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times 10^3 \times 0,0127}} \right)$$
$$R = 1,45 \Omega$$

Untuk tanah ladang, maka :

$$R = \frac{100}{2\pi \times 5,5} \times \left(\ln \frac{2 \times 5,5}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times 10^3 \times 0,0127}} \right)$$
$$R = 4,85 \Omega$$

Untuk tanah pasir basah, maka :

$$R = \frac{200}{2\pi \times 5,5} \times \left(\ln \frac{2 \times 5,5}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times 10^3 \times 0,0127}} \right)$$
$$R = 9,7 \Omega$$

Pada kondisi tanah dengan pasir basah sampai dengan tanah yang berbatu perlu digunakan sistem *counterpoise* untuk mendapatkan nilai tahanan pentanahan 5 ohm. Sehingga perlu dipasang kawat baja yang ditanam dalam tanah dengan panjang tertentu. Berikut ini rumus persamaan yang digunakan untuk sistem *counterpoise* :

$$R = \sqrt{r \cdot \rho} \times \coth^{-1} \left(L \sqrt{r / \rho} \right) \Omega$$

Untuk menentukan panjang kawat baja yang ditanam, maka menggunakan persamaan :

$$L = \sqrt{\rho / r} \times \coth^{-1} \left(R / \sqrt{r \cdot \rho} \right) \text{ m}$$

Dimana :

L = panjang kawat (meter)

R = tahanan pentanahan (ohm)

r = nilai reistansi kawat (ohm/meter)

Dengan target tahanan menara = 5 ohm, kawat baja yang digunakan luas permukaannya = 38 mm², dan memiliki tahanan 0,519 ohm/km. maka panjang kawat baja yang dibutuhkan adalah :

Untuk tanah pasir basah, maka :

$$L = \sqrt{\rho/r} \times \coth^{-1} \left(R/\sqrt{r \cdot \rho} \right) \text{ m}$$

$$L = \sqrt{200/0,000519} \times \coth^{-1} \left(5/\sqrt{0,000519 \times 200} \right)$$

$$L = 40,05 \text{ m}$$

Untuk kerikil basah, maka :

$$L = \sqrt{\rho/r} \times \coth^{-1} \left(R/\sqrt{r \cdot \rho} \right) \text{ m}$$

$$L = \sqrt{500/0,000519} \times \coth^{-1} \left(5/\sqrt{0,000519 \times 500} \right)$$

$$L = 100,35 \text{ m}$$

Untuk pasir atau kerikil kering, maka :

$$L = \sqrt{\rho/r} \times \coth^{-1} \left(R/\sqrt{r \cdot \rho} \right) \text{ m}$$

$$L = \sqrt{1000/0,000519} \times \coth^{-1} \left(5/\sqrt{0,000519 \times 1000} \right)$$

$$L = 201,4 \text{ m}$$

Untuk tanah berbatu, maka :

$$L = \sqrt{\rho/r} \times \coth^{-1} \left(R/\sqrt{r \cdot \rho} \right) \text{ m}$$

$$L = \sqrt{3000/0,000519} \times \coth^{-1} \left(5/\sqrt{0,000519 \times 3000} \right)$$

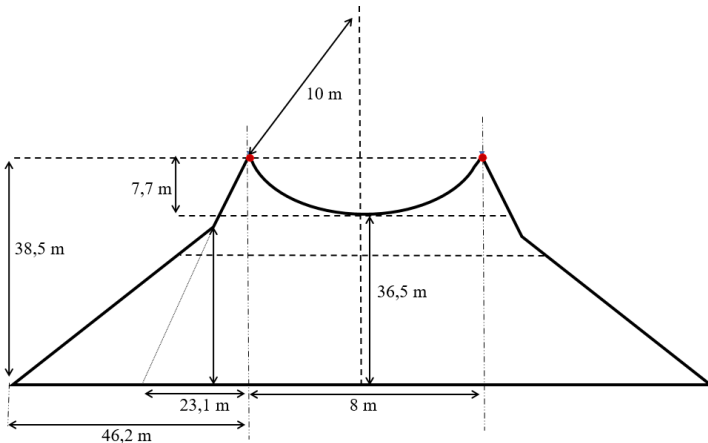
$$L = 612,9 \text{ m}$$

4.18 Perancangan Kawat Tanah Sebagai Pelindung Sambaran Petir

Dari perencanaan 150 kV pada pembahasan sebelumnya didapat data sebagai berikut : Kawat penghantar ACSR, 2 *bundle* konduktor, radius sub konduktor 14 cm. Andongan kawat fasa pada suhu 40°C = 1,25 m . oleh sebab itu kawat tanah pelindung sambaran petir dipilih konduktor jenis ACSR dengan luas penampang 50 mm² yang diletakan ujung menara, sehingga tinggi kawat tanah adalah 53 meter. Andongan kawat tanah menurut SPLN 121-1996 dihitung 80% dari andongan konduktor fasa. Dengan demikian maka nilai andongan kawat tanah adalah :

$$\text{Andongan GSW} = 80\% \times 1,25 = 1 \text{ m}$$

Berikut ini gambar daerah perlindungan kawat tanah dengan menggunakan dua buah kawat tanah, bisa dilihat pada gambar 4.11 dibawah ini.



Gambar 4.9 Rencana Daerah Perlindungan Kawat Tanah

4.19 Hitungan untuk Kegagalan Perisaian SUTT 150 kV

Langkah-langkah untuk perhitungan meminimalisasikan tingkat kegagalan perisaian akibat gangguan petir adalah sebagai berikut :

Hitungan tinggi rata-rata kawat tanah dan konduktor fasa diatas tanah datar adalah :

$$\text{Kawat fasa : } Y\phi = 25,5 - 1,25 = 24,25 \text{ m}$$

$$\text{Kawat tanah : } Yg = 38,5 - 1 = 37,5 \text{ m}$$

- Hitungan tegangan lompatan api dari isolator pada $t = 6 \mu\text{det}$ adalah :

$$V_{50\%} = \left(K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \right) \times 10^3 \text{ kV}$$

$$V_{50\%} = \left((0,4 \times D) + \frac{(0,71 \times D)}{6^{0,75}} \right) \times 10^3$$

$$V_{50\%} = \left((0,4 \times 1,606) + \frac{(0,71 \times 1,606)}{6^{0,75}} \right) \times 10^3$$

$$V_{50\%} = 939,83 \text{ kV}$$

- Hitungan radius amplop korona untuk kegagalan perisaian yaitu:

$$R \cdot \ln \left(\frac{2h_t}{R} \right) = \frac{V}{E_0}$$

$$R \cdot \ln \left(\frac{2 \times 24,25}{R} \right) = \frac{1691,7}{1500}$$

$$R = 0,205 \text{ meter}$$

- Hitungan radius ekivalen adalah :

$$r_{eki} = \sqrt[3]{r_1 d_{12} d_{13} d_{14}}$$

$$r_{eki} = \sqrt[3]{0,01702 \times 0,26 \times 0,26 \times 0,36} = 0,14 \text{ m}$$

- Radius korona dari konduktor berkas adalah :

$$R_c = R + r_{eki}$$

$$R_c = 0,205 + 0,14 = 0,345 \text{ m}$$

- Impedansi surja kawat fasa (*bundle* konduktor) adalah :

$$Z_\phi = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r_{eki}} \cdot \ln \frac{2h}{R_c}}$$

$$Z_\phi = 60 \sqrt{\ln \frac{2 \times 24,25}{0,14} \times \ln \frac{2 \times 24,25}{0,345}}$$

$$Z_\phi = 322,95 \Omega$$

- Arus minimum yang mengakibatkan lompatan api karena kegagalan perisaian adalah :

$$I_{\min} = \left(\frac{2 \cdot V_{50\%}}{Z_\phi} \right)$$

$$I_{\min} = \left(\frac{2 \times 939,83}{322,95} \right) = 5,82 \text{ kA}$$

- Jarak sambaran minimum adalah :

$$S = 8 \cdot I_{\min}^{0,65}$$

$$S = 8 \times 5,82^{0,65} = 25,13 \text{ m}$$

- Daerah tak terlindungi Terlebih dahulu diperiksa harga βS ,
Dimana untuk menara SUTT harga $\beta = 1$
Jadi, $\beta S = 1 \times 25,13 = 25,13$
Sehingga didapat lebar $\beta S > Y\phi$
Maka untuk menghitung X_s menggunakan persamaan berikut :

$$X_s = S (\cos \theta + \sin (a_s - \omega))$$

Dimana :

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\beta S - Y\phi}{S} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{25,13 - 24,25}{25,13} \right) = 2$$

$$\omega = \cos^{-1} \left(\frac{F}{2S} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{21,13}{2 \times 25,13} \right) = 65,14$$

$$a_s = \tan^{-1} \left(\frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{10 - 8}{37,5 - 24,25} \right) = 8,58$$

Maka,

$$X_s = S(\cos \theta + \sin(a_s - \omega))$$

$$X_s = 25,13(\cos(2) + \sin(8,58 - 65,14))$$

$$X_s = 4,14 \text{ m}$$

- Jarak sambaran maksimum adalah :

$$S_{\max} \approx BO = Y_0 \left| \frac{B_s - \sqrt{B_s^2 + A_s C_s}}{A_s} \right|$$

Dimana :

$$Y_0 = \frac{Y_G + Y_\phi}{2} = \frac{37,5 + 24,25}{2} = 30,87$$

$$m = \frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} = \frac{10 - 8}{37,5 - 24,25} = 0,15$$

$$A_s = m^2 - m^2 \beta - \beta^2 = 0,15^2 - (0,15^2 \times 1) - 1^2 = -1$$

$$B_s = \beta(m^2 + 1) = 1(0,15^2 + 1) = 1,023$$

$$C_s = (m^2 + 1) = 0,15^2 + 1 = 1,023$$

Maka

$$S_{\max} \approx BO = Y_0 \left| \frac{B_s - \sqrt{B_s^2 + A_s C_s}}{A_s} \right|$$

$$S_{\max} = 30,87 \left| \frac{1,023 - \sqrt{1,023^2 + (-1 \times 1,023)}}{-1} \right|$$

$$S_{\max} = 26,84 \text{ m}$$

Dan nilai I_{\max} adalah :

$$I_{\max} = 0,041 \times S^{1,54} = 0,041 \times 26,84^{1,54} = 6,5 \text{ A}$$

- Probabilitas arus sama atau melebihi I_{\min} dan I_{\max} adalah :

$$P_{\min} = e^{-\frac{5,82}{34}} = 0,84$$

$$P_{\max} = e^{-\frac{6,5}{34}} = 0,83$$

- Gangguan kilat karena kegagalan perisaian adalah :

$$N_{SF} = 0,015 \text{ IKL} \frac{X_s}{2} (P_{\min} - P_{\max})$$

$$N_{SF} = 0,015 \times 150 \times \frac{0,3}{2} \times (0,84 - 0,83)$$

$$N_{SF} = 0,003 \text{ Gangguan/100 km - tahun}$$

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya dan berdasarkan data-data yang telah tersedia maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Saluran transmisi ini menggunakan menara *suspension* setinggi 38,5 m dan menara tension setinggi 32,2 m, sirkuit vertikal ganda untuk menyalurkan daya sebesar 900 MW dengan 2 *bundle* konduktor ACSR 45/7 650 mm², isolator menggunakan *double string* 2 x 11 buah dan menggunakan menara transmisi dengan jarak antar menara 250-350 m.
2. Pentanahan kaki menara menggunakan metode :
 - *Ground Rod* dengan 4 buah rod elektrode panjang 5,5 m dan jari-jari 1,27 cm pada tanah rawa/sawah didapat tahanan kaki menara 1,45 ohm dan pada tanah ladang 4,85 ohm
 - *Counterpoise*, dengan kawat baja 38 mm², untuk jenis tanah pasir basah dibutuhkan panjang kawat 40,05 m, krikil basah 100,35 m, kerikil kering 201,4 m dan tanah berbatu 612,9 m
3. Kawat pelindung petir menggunakan kawat tanah baja (GSW) 2 x ACSR 50 mm² dengan besar andongan 1 m.
4. *Sagging* untuk dua menara yang sama tinggi antara 1,25 m - 6,7 m dan untuk dua menara yang beda tinggi ($h=1$ m) antara 0,8 - 6,2 m

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan diatas maka penulis menyarankan :

1. Perlu dilakukan suatu studi lebih mendalam mengenai permasalahan transmisi terutama dengan melakukan survey lapangan terhadap kondisi jalur transmisi yang direncanakan sehingga diperoleh data dan hasil perencanaan yang lebih maksimal.
2. Perencanaan saluran transmisi ini bisa menjadi referensi untuk realisasi pembangunan saluran transmisi dari Kayan Hydropower ke Grid Kalimantan (Long Apari).

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

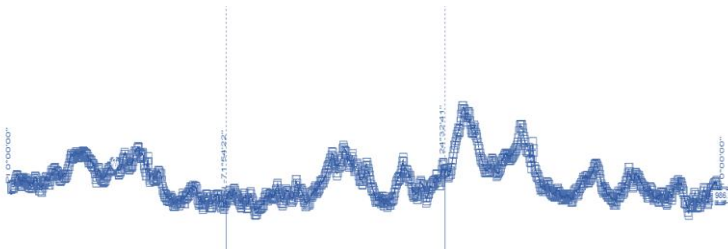
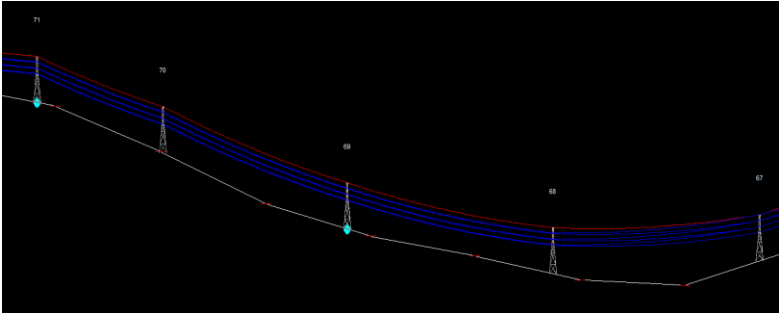
DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Arismunandar Dr., S. Kuwara Dr., “Buku Pegangan Teknik Tegangan Listrik Jilid II”, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, Cetakan Ketujuh, 2004
- [2] Aslimeri, dkk.. “Transmisi Tenaga Listrik”, Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta, , 2013
- [3] Syariffudin M., Ir., M.Eng., “Perencanaan Jaringan Transmisi Tegangan Tinggi”, 1999
- [4] Bonggas L. Tobing, Edisi Kedua “Peralatan Tegangan Tinggi”, PT. Erlangga, Jakarta, 2012
- [5] Stevenson William D., “Element of Power System Analisis”, McGraw Hill, New York, 1982
- [6] Turan Gonen, Third Edition “Electrical Power Transmission System Engineering” Analysis and Design, California State University, Sacramento, USA, 2014
- [7] T. S. Hutaeruk, “Transmisi Daya Listrik”, PT. Erlangga, Jakarta, 1985
- [8] Udo T., “Minimum Phase to Phase Electrical Clearance Based On Switching Surge and Lightning Surge”, J Trans. On Power System App, 1974
- [9] Zuhail, “Dasar Teknik Tegangan Listrik dan Elektronika Daya”, Pustaka Utama, Jakarta, 2000
- [10] Hari Kurniawan, “Studi Pentanahan Kaki Menara Transmisi 500 kV Sumatera Turun Pranap New Aurduri”, JEPCA, Surabaya : ITS, 2007
- [11] Nizar Nasrulloh, “Studi Perencanaan Saluran Transmisi 150 kV antara PLTU Jatim 1 – GI Pacitan”, Undergraduate Tugas Akhir, Surabaya : ITS, 2007
- [12] Widen Lukmantono, “Studi Perencanaan Saluran Transmisi 150 kV Bambe Incomer”, Undergraduate Tugas Akhir, Surabaya : ITS, 2012
- [13] Buku Pedoman Pemeliharaan, “Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET)”, Jakarta, 2014
- [14] Andrew S. Timscheff, “Calculation of Gradien for Phase on Three Phase Bundle Conductor Line”, IEEE Trans. On Power System App, 1971

- [15] RUPTL, “Rencana Usaha Penyedia Tegangan Listrik PT. PLN (Persero) 2019-2028”, Jakarta, 2019
- [16] SPLN 121, “Konstruksi Saluran Udara Tegangan Tinggi 70 kV dan 150 kV dengan Tiang Beton/Baja”, Jakarta, 1996
- [17] SPLN 41-7, “Spesifikasi Konduktor ACSR”, Jakarta, 1981
- [18] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, “Ruang Bebas dan Jarak Bebas Minimu Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT), Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET), dan Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah (SUTTAS) Untuk Penyaluran Tenaga Listrik”, Jakarta, 2015
- [19] Badan Standarisasi Nasional, “Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000)”, Jakarta, 2000
- [20] Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia, “Standar Spesifikasi dan Standar Harga Menara Transmisi dan Konduktor Produk Dalam Negeri Dalam Rangka Percepatan Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan”, Jakarta, 2016
- [21] Badan Pusat Statistik (BPS), “Letak Geografis Kalimantan”, <URL : <https://sp2010.bps.go.id/index.php/site/index> >, 2010

LAMPIRAN

---Halaman ini sengaja dikosongkan---



Desain dan Kontur Tanah Saluran Trannsmisi 150 kV Kayan
Hydropopwer-Long Apari dengan PLS-Cadd

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kuningan - Jawa Barat pada tanggal 29 Maret 1995. Anak ke-3 dari lima bersaudara Saat ini Penulis bermukim di Desa Cilimus Rt.07 Rw.02 Kuningan Jawa Barat. Pendidikan Diploma (D-3) ditempuh di Program Studi Teknik Elektro Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang pada tahun 2013. Kemudian melanjutkan jenjang Pendidikan Sarjana Program Studi Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada tahun 2017.

Penulis memiliki pengalaman dalam organisasi. Penulis dapat dihubungi melalui *email* : Redipermatahati@gmail.com.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---