



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI
500 kV TJ. REDEB – SABAH SEHUBUNGAN DENGAN
EKSPOR ENERGI LISTRIK**

Naufal Hilmi Utomo
07111745000083

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

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



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI
500 kV TJ. REDEB – SABAH SEHUBUNGAN DENGAN
EKSPOR ENERGI LISTRIK**

Naufal Hilmi Utomo
07111745000083

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

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

---Halaman ini sengaja dikosongkan---



FINAL PROJECT - EE 184801

**PLANNING AND DESIGN TRANSMISSION LINE 500 kV
TJ. REDEB – SABAH RELATED TO EXPORT OF
ELECTRICAL ENERGY**

Naufal Hilmi Utomo
07111745000083

Advisors

Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

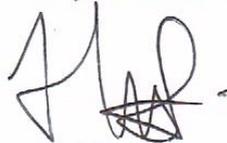
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini Saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir Saya dengan judul "**Perencanaan dan Desain Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah Sehubungan Dengan Ekspor Energi Listrik**" adalah 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 pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2019



Naufal Hilmi Utomo
NRP.0711174500083

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

**PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI 500 kV
TJ. REDEB – SABAH SEHUBUNGAN DENGAN EKSPOR
ENERGI LISTRIK**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

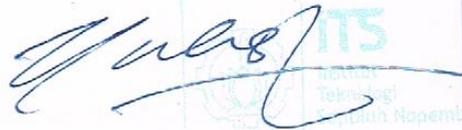
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dimas Anton A., S.T., M.T., Ph.D
NIP 19810905 200501 1 002



Dr. Eng. I Made Y. N., S.T., M.Sc.
NIP 19700712 199802 1 001



---Halaman ini sengaja dikosongkan---

PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI 500 kV TJ. REDEB – SABAH SEHUBUNGAN DENGAN EKSPOR ENERGI LISTRIK

Nama : Naufal Hilmi Utomo
Pembimbing I : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
Pembimbing II : Dr.Eng. I Made Yulistya N., S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Energi listrik merupakan energi yang sangat penting peranannya disaat sekarang. Penggunaan energi listrik semakin lama semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk. Salah satu proses penyaluran energi listrik menuju konsumen yaitu melalui saluran transmisi. Saluran transmisi kali ini menggunakan level tegangan 500 kV, hal ini disebabkan karena jarak antara pembangkitan energi listrik dengan ujung penerima saluran transmisi terpaut sangat jauh. Sehingga penurunan tegangan pada ujung penerima saluran transmisi tidak terlalu besar. Pada Tugas Akhir ini, akan dibahas tentang perencanaan dan desain saluran transmisi 500 kV mulai dari Tj. Redep sampai Sabah sepanjang \pm 500 km yang melewati Provinsi Kalimantan Timur, Provinsi Kalimantan Utara, dan Sabah Malaysia. Dengan kondisi geografis di daerah Kalimantan, dibutuhkan *software* PLS CADD untuk mendesain saluran transmisi. Dalam *software* tersebut terdapat tampilan seperti GOOGLE EARTH yang digunakan untuk melihat permukaan bumi yang akan dilewati saluran transmisi. Karena tidak semua permukaan bumi bisa dilalui saluran transmisi. Pembangunan SUTET 500 kV ini direncanakan akan menyalurkan daya sebesar 300 MVA. Tugas Akhir ini akan menentukan lokasi yang sesuai untuk dilalui saluran transmisi, peralatan atau material apa saja yang digunakan, dan konstruksi seperti apa yang tepat dengan kondisi permukaan bumi yang dilalui saluran transmisi. Sehingga dapat dilakukan penyaluran energi listrik yang sesuai secara teknis dan ekonomis. Saluran transmisi 500 kV Tj. Redeb sampai Sabah ini diharapkan dapat mensuplai energi listrik dan bisa meningkatkan keandalan jaringan di pulau Kalimantan, khususnya Provinsi Kalimantan Timur dan Provinsi Kalimantan Utara.

Kata Kunci : Perencanaan saluran transmisi, Transmisi 500 kV, Energi listrik.

---Halaman sengaja dikosongkan---

**PLANNING AND DESIGN TRANSMISSION LINE 500 kV
TJ. REDEB – SABAH RELATED TO EXPORT
OF ELECTRICAL ENERGY**

Name : Naufal Hilmi Utomo
1st Advisor : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.
2nd Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya N., S.T., M.Sc.

ABSTRACT

Electrical energy is energy that is very important role in the present moment. The use of electricity is increasing along with growth residents. One of the processes for distributing electrical energy headed consumer that is through the transmission line. Transmission line this time using a 500 kV voltage level, this is due to distance between generation electrical energy with the receiving end of the transmission line is very tightly connected far away. So that decline voltage at the end of the receiver the transmission line is not too big. In this Final Project, we will discuss the planning and design of the 500 kV transmission line starting from Tj. Redeb to Sabah along the ± 500 km passing East Kalimantan Province, North Kalimantan Province, and Sabah Malaysia. With the geographical condition in Kalimantan, PLS CADD software needed to download transmission line design. In the software there is a display like GOOGLE EARTH that is used to see the surface of the earth that will pass through the transmission line. Because not all surface of the earth can be traversed by the transmission line. Development SUTET 500 kV planned will channel power of 300 MVA. This Final Project will determine the appropriate location for traversing transmission line, equipment or what material only use, and what kind of construction is right with the surface conditions the earth through which the transmission line. So that the distribution of electrical energy that is technically and economically suitable can be done. Transmission line 500 kV Tj. Redeb to Sabah is expected to be able to supply electrical energy and can improve network reliability on the Island of Borneo, especially the Province of East Kalimantan dan the Province of Nort Kalimantan.

Keywords : *Planning transmission line, Transmission 500 kV, Electrical energy.*

---Halaman sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas akhir yang berjudul “**Perencanaan dan Desain Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah Sehubungan Dengan Ekspor Energi Listrik**”.

Dalam pelaksanaan dan penyelesaian tugas akhir ini penulis banyak mendapatkan bantuan, dukungan dan informasi 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 Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing, atas segala ilmu dan waktu yang telah diberikan untuk membimbing penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
4. Bapak Lalu Muhamad Jaelani, S.T., M.Sc., Ph.D. Selaku dosen geomatika, yang telah membantu dalam pemilihan jalur saluran transmisi 500 kV dari Tj. Redeb sampai Sabah.
5. Partner sesama TA perencanaan dan desain saluran transmisi, Redi Permata Hati.
6. Mas Arief, teman-teman perkuliahan, dan pihak-pihak lainnya yang membantu pengerjaan TA ini yang tidak dapat Saya sebutkan satu-persatu.
7. Puspa Lely Ramadhania, atas segala dukungan, semangat, dan doa serta kasih yang diberikan tiada henti.

Akhir kata, penulis berharap Tugas Akhir ini bisa bermanfaat bagi siapapun yang membaca.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi	4
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 Konsep Perencanaan Saluran Transmisi	5
2.2 Konfigurasi Saluran Transmisi	5
2.3 Dasar Pemilihan Tegangan.....	6
2.4 Komponen Utama Saluran Transmisi	6
2.2.1 Menara	7
2.2.2 Konduktor Penghantar	7
2.2.3 Isolator	8
2.2.4 Kawat Penumaian.....	9
2.3 Konstruksi Menara Transmisi	10
2.3.1 Jenis dan Fungsi Menara.....	10
2.3.2 Bagian-bagian Menara.....	13
2.3.3 Penumaian Menara.....	17
2.4 Perlengkapan Konduktor Penghantar.....	19
2.4.1 Sambungan Penghantar (<i>Joints</i>).....	19
2.4.2 Perentang (<i>Spacer</i>)	20
2.4.3 Batang-batang Pelindung (<i>Armour Rods</i>).....	21
2.4.4 Peredam (<i>Dampers</i>).....	21

2.5	Spesifikasi Isolator Saluran Transmisi	22
2.5.1	Karakteristik Isolator.....	23
2.5.2	Peralatan Bantu Isolator	23
2.5.3	Pengotoran Isolator	25
2.5.4	Pemburukan Isolator	26
2.6	Konduktor Penangkal Petir (<i>Ground Wire</i>)	27
2.7	Pengaruh SUTET 500 kV Terhadap Lingkungan	28

BAB 3 RENCANA JALUR TRANSMISI 500 kV

	TJ. REDEB – SABAH.....	29
3.1	Rencana Jalur Transmisi 500 kV	29
3.2	Kondisi Geografis Jalur Transmisi.....	30
3.2.1	Tipe Iklim	30
3.2.2	Temperatur Udara.....	30
3.2.3	Tekanan Udara.....	30
3.2.4	Kelembaban Udara.....	31
3.2.5	Curah Hujan.....	31
3.2.6	Kualitas Udara dan Kebisingan	31
3.3	Alasan Menggunakan SUTET 500 kV	31
3.4	Kapasitas Daya Saluran Transmisi.....	32
3.5	Pemilihan Jenis Konduktor.....	32
3.6	Penentuan <i>Outline</i> Tower	33
3.6.1	Andongan	34
3.6.2	Andongan Kawat Fasa	35
3.6.3	Penentuan Jarak Bebas Fasa ke Tanah (<i>Phase to Ground Clearance</i>).....	37
3.6.4	Penentuan Jarak Bebas Fasa ke Fasa (<i>Phase to Phase</i>).....	37
3.7	Perhitungan GMR dan GMD	38
3.8	Resistansi Konduktor.....	39
3.9	Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi	40
3.10	<i>Bundle Conductor</i> (Kawat Berkas)	41
3.11	Gradien Tegangan Permukaan Konduktor Maksimum.....	42
3.12	Korona Pada Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi.....	44
3.12.1	Proses Terjadinya Korona	44
3.12.2	Tegangan Disruptive Kritis	44
3.12.3	Rugi Daya Korona	46
3.13	Perencanaan Isolasi Saluran Transmisi	48
3.14	Pentanahan Kaki Menara	52
3.15	Penangkapan Kilat oleh Saluran Transmisi	53

3.16	Jumlah Sambaran Kilat Ke Bumi, Lompatan Api, dan Busur Api	55
3.17	Radius Efektif Kawat Tanah dan Kawat Fasa dengan Korona ..	56
3.17.1	Radius Efektif Kawat Tanah dengan Korona	56
3.17.2	Radius Efektif Kawat Berkas dengan Korona	57
3.18	Impedansi Surja Kawat dan Impedansi Surja Menara	58
3.19	Kegagalan Perisaian	60
3.20	Ruang Bebas	66

BAB 4 PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI 500 kV TJ. REDEB – SABAH SEHUBUNGAN DENGAN EKSPOR

	ENERGI LISTRIK.....	69
4.1	Pemilihan Konfigurasi Saluran Transmisi.....	69
4.2	Ukuran dan Tipe Konduktor Saluran Transmisi.....	70
4.3	Menghitung Andongan (<i>Sagging</i>)	71
4.4	Penentuan Jarak Bebas Konduktor Jaringan SUTET 500 kV (<i>Clearance</i>).....	75
4.5	Perhitungan Spasi Antar Sub <i>Bundle Conductor</i> Dalam Satu Fasa	77
4.6	Perhitungan Jari-jari Ekuivalen <i>Bundle Conductor</i> ($Req = GMR$).....	81
4.7	Perhitungan GMD	81
4.8	Perhitungan Resistansi <i>Bundle Conductor</i>	82
4.9	Rugi Daya Saluran Transmisi	83
4.10	Gradien Tegangan Permukaan Konduktor Maksimum	83
4.11	Tegangan Disruptive Kritis	85
4.12	Rugi Daya Korona	86
4.13	Perencanaan Konduktor Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb sampai Sabah	87
4.14	Perhitungan Tegangan <i>Flashover</i> Kritis dan Surja <i>Switching</i> ...	89
4.15	Perencanaan Isolator Saluran Transmisi	94
4.16	Pemilihan Menara	94
4.17	Penentuan Pondasi Menara.....	98
4.18	Pentanahan Kaki Menara.....	99
4.19	Perancangan Kawat Tanah Sebagai Pelindung Sambaran Petir	103
4.20	Hitungan untuk Kegagalan Perisaian SUTET 500 kV.....	104
4.21	Hitungan Impedansi Menara Transmisi	108

4.22	Pedoman Teknis Pengurangan Dampak Medan Listrik dan Medan Magnet	109
4.23	Jalur Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah.....	110
4.24	Desan Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah	112
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	113
5.1	Kesimpulan	113
5.2	Saran	114
	DAFTAR PUSTAKA.....	115
	LAMPIRAN	
	RIWAYAT PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Menara <i>Lattice</i> Model Piramida Sirkit Ganda.....	9
Gambar 2.2	Pondasi Normal.....	15
Gambar 2.3	Pondasi Spesial (Pancang).....	15
Gambar 2.4	Halaman Menara	16
Gambar 2.5	Kaki Menara	16
Gambar 2.6	Selongsong Baja dan Selongsong Alumunium.....	19
Gambar 2.7	Perentang (<i>Spacer</i>)	21
Gambar 2.8	Batang Pelindung	21
Gambar 2.9	Peredam (<i>Damper</i>)	22
Gambar 2.10	Isolator Gantung (<i>Suspension</i>) dan Isolator Tarik (<i>Tension</i>).....	23
Gambar 2.11	<i>Arcing Horn</i> Pada Isolator.....	24
Gambar 2.12	Daerah Lindungan Dua Kawat Tanah.....	27
Gambar 3.1	Rencana Jalur Transmisi Secara Garis Lurus	29
Gambar 3.2	Andongan dan <i>Ground Clearence</i>	35
Gambar 3.3	Konfigurasi <i>Bundle Conductor</i>	41
Gambar 3.4	Lebar Jalur Perisaian Terhadap Sambaran Kilat.....	53
Gambar 3.5	Penampang Menara transmisi	60
Gambar 3.6	Perisaian Tidak Sempurna	62
Gambar 3.7	Perisaian Sempurna	64
Gambar 3.8	Cara Menentukan Harga Y_0 untuk Memperoleh S_{max} ..	64
Gambar 3.9	Ruang Bebas Disekitar Menara	66
Gambar 4.1	Jarak Bebas Konduktor Dan Kawat Tanah	77
Gambar 4.2	Jarak Antar Sub <i>Bundle Conductor</i> Satu Fasa.....	81
Gambar 4.3	Konfigurasi Konduktor Hasil Perhitungan	88
Gambar 4.4	Grafik Karakteristik Tegangan <i>Flashover</i> Kritis Terhadap Jumlah Isolator untuk Isolator Konfigurasi V <i>String</i>	92
Gambar 4.5	Menara Transmisi 500 kV	96
Gambar 4.6	Desain Saluran Transmisi Dalam Satu Gawang	98
Gambar 4.7	Konstruksi Pondasi (Tapak Samping).....	99
Gambar 4.8	Pemasangan Batang Pentanahan Kaki Menara (Tapak Atas)	103
Gambar 4.9	Daerah Perlindungan Kawat Tanah Yang Direncanakan	104
Gambar 4.10	Jalur Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah	111
Gambar 4.11	Desain Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah ..	112

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tipe dan Fungsi Menara Transmisi	12
Tabel 2.2	Penambahan dan Pengurangan Kaki Menara	12
Tabel 2.3	Jenis Tanah Untuk Pondasi	14
Tabel 2.4	Kondisi Tanah	14
Tabel 2.5	Resistansi Jenis Tanah	18
Tabel 2.6	Klasifikasi Daerah Pengotoran.....	26
Tabel 3.1	Korelasi Tegangan Standar Terhadap Koefisien Kapasitas (k).....	32
Tabel 3.2	<i>Span</i> Standar.....	34
Tabel 3.3	Faktor Permukaan Korona	46
Tabel 3.4	Fungsi Rugi Daya (F).....	47
Tabel 3.5	Tingkat Kontaminasi.....	49
Tabel 3.6	Relasi Empiris Antara Kerapatan Sambaran Kilat dan Hari Guruh Tahunan	55
Tabel 3.7	Jarak Bebas Minimum SUTET	66
Tabel 4.1	Standar <i>Span</i>	72
Tabel 4.2	Jarak Bebas Minimum Antara Konduktor SUTET 500 kV dengan Benda Lain	89
Tabel 4.3	Tingkat Kontaminasi.....	91
Tabel 4.4	Spesifikasi Isolator yang Dipilih	93
Tabel 4.5	Hasil Perencanaan Isolator Saluran Transmisi 500 kV.....	94
Tabel 4.6	Berat Menara Standar dan Perubahanannya	97
Tabel 4.7	Tahanan Jenis Tanah.....	99

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan energi listrik di Indonesia mengalami suatu peningkatan, hal ini disebabkan karena pertambahan penduduk dan pertumbuhan ekonomi di Indonesia mengalami peningkatan setiap tahunnya. Jumlah penduduk di Indonesia sekitar 267 juta jiwa yang membuat Indonesia berada pada peringkat 4 di dunia dengan jumlah terbanyak. Pertambahan jumlah penduduk di Indonesia berdasarkan sensus mengalami peningkatan sebesar 1,49 % per tahun. Dan penggunaan energi listrik di Indonesia sudah mencapai 93,89 %. Sedangkan untuk provinsi kalimantan utara jumlah penduduk sekitar 3,5 juta jiwa, dan laju pertambahan jumlah penduduk mencapai angka 3,81 % per tahun. penggunaan energi listrik sudah mencapai 94,17 %. [23] Jika dilihat dari data tersebut energi listrik memiliki peranan yang penting bagi kelangsungan hidup masyarakat di Indonesia.

Dalam rangka memenuhi permintaan energi listrik di seluruh wilayah Indonesia maka diperlukan pembangunan jaringan listrik di berbagai daerah, terutama di daerah Tj. Redep sampai sabah yang terletak di pulau Kalimantan. Jaringan listrik yang akan dibangun adalah jaringan saluran transmisi, karena jarak antara Tj. Redep sampai Sabah sekitar 500 KM. Dan kondisi geografis buminya meliputi hutan, pegunungan, sungai, lembah, pemukiman warga, dan jalan raya. Kondisi geografis yang paling mendominasi adalah hutan-hutan yang sangat luas, sehingga jarak pemukiman padat penduduk antara satu daerah ke daerah yang lain cukup jauh. [25] Dengan kondisi seperti ini perlu pertimbangan yang matang untuk pembuatan saluran transmisi.

Dalam pembangan jalur transmisi membutuh beberapa pertimbangan antara lain kondisi geografis bumi antar daerah, kondisi iklim, dan cuaca. Perlunya diperhatikan kondisi geografis bumi, karena di Kalimantan masih banyak daerah yang belum ditempati oleh manusia. Pembuatan saluran tranmisi membutuhkan konstruksi yang sesuai dengan kondisi lingkungan sekitar. Hal ini disebabkan karena tidak semua permukaan bumi bisa dilalui saluran transmisi. Karena pada jalur transmisi bertegangan sebesar 500 kV, sehingga butuh pembebasan lahan yang cukup luas jika menggunakan saluran transmisi udara. Kalau jalur transmisi melewati pemukiman warga bisa menggunakan saluran tranmisi

bawah tanah. Dan kalau melewati laut atau sungai bisa menggunakan saluran transmisi di dalam air. Akan tetapi pembangunan saluran transmisi untuk konstruksi saluran bawah tanah dan di dalam air membutuhkan biaya yang lebih mahal dibandingkan dengan konstruksi saluran udara. Dan perlunya diperhatikan kondisi iklim dan cuaca, karena dalam pembuatan saluran transmisi membutuhkan beberapa material yaitu menara atau tiang transmisi, isolator, kawat konduktor penghantar, dan kawat pembumian. [14] Bahan baku dari material yang dipakai perlu disesuaikan dengan kondisi iklim dan cuaca di sekitar. Karena apabila bahan baku material tidak disesuaikan dengan kondisi iklim dan cuaca di sekitar, maka lebih cepat timbul material *breakdown*. Sehingga pemakaian material yang telah terpasang bisa bertahan sampai waktu yang telah ditentukan.

Dilakukan beberapa pertimbangan dalam pembuatan saluran transmisi digunakan untuk menjaga keandalan jaringan, misalnya saja mempermudah bila melakukan pemeliharaan berkala pada jaringan. Dan apabila terjadi gangguan pada saluran transmisi, penanganannya tidak terlalu rumit dalam arti untuk menemukan titik gangguannya tidak terlalu susah. Sehingga harapan dari pembuatan perencanaan dan simulasi transmisi energi listrik ini bisa mendapatkan sebuah hasil penyaluran transmisi energi listrik yang efektif.

1.2 Rumusan Masalah

Seiring dengan pertambahan penduduk di Kalimantan utara (Sabah), kebutuhan energi listrik juga meningkat, dan sumber energi listriknya diambilkan dari Tj Redep. Sehingga perlu dilakukan pembangunan saluran transmisi dari Tj Redep sampai Sabah. Pentingnya penentuan material yang digunakan dalam pembuatan saluran transmisi dan bagaimana cara meminimalisir dampak terhadap lingkungan sekitar dari pembangunan saluran transmisi 500 kV Tj Redep sampai Sabah.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui daerah mana yang bisa dilewati saluran transmisi 500 kV dan material apa saja yang bisa digunakan dengan kondisi lingkungan di daerah Kalimantan

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

- a. Saluran transmisi melalui saluran udara (*overhead line*).
- b. Tegangan yang digunakan dalam saluran transmisi adalah 500 kV.
- c. Pemilihan peralatan saluran transmisi yang digunakan sesuai dengan kondisi geografis daerah kaliamantan

1.5 Metodologi

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini metodologi yang digunakan adalah :

- a. Studi Literatur
Pada tahap ini dilakukan studi dengan cara mengumpulkan buku dan referensi yang berkaitan dengan perencanaan saluran transmisi. Kemudian buku dan referensi tersebut akan dijadikan literatur untuk pengerjaan dan penyelesaian Tugas Akhir.
- b. Pencarian Data
Dilakukan pencarian data yang berhubungan dengan permasalahan, antara lain data ketinggian tanah di daerah kalimantan dengan menggunakan aplikasi GOOGLE EARTH.
- c. Analisa Data
Setelah mendapatkan data, kemudian dianalisa untuk menentukan peralatan yang digunakan dalam melakukan simulasi saluran transmisi.
- d. Pembuatan Simulasi
Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* PLS CADD untuk mengetahui bentuk saluran transmisi.
- e. Penyusunan Laporan Tugas Akhir
Penyusunan laporan Tugas Akhir dalam bentuk buku Tugas Akhir.

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 bias 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 500 kV dari Tj. Redeb sampai Sabah.
- Bab 4 : Perencanaan Saluran Transmisi 500 kV
Pada bab yang keempat berisi tentang proses pemilihan peralatan yang digunakan untuk pembuatan saluran transmisi 500 kV di daerah Kalimantan dari Tj. Redeb sampai Sabah
- Bab 5 : Penutup
Bab ini berisi kesimpulan dan saran sehubungan dengan penulisan laporan Tugas Akhir ini.

1.7 Relevansi

Dengan dilakukan pembuatan Tugas Akhir ini, hasil perencanaan dan desain saluran transmisi 500 kV dari Tj. Redeb sampai Sabah. Maka diharapkan Tugas Akhir ini dapat digunakan sebagai acuan atau referensi guna realisasi pembangunan saluran transmisi 500 kV dari Tj Redep sampai Sabah.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Konsep Perencanaan Saluran Transmisi

Pusat pembangkitan tenaga listrik di Indonesia umumnya terletak di daerah yang dekat dengan laut atau jauh dari pusat energi listrik itu digunakan, hal itu disebabkan karena pembangkit listrik di Indonesia banyak yang menggunakan bahan bakar fosil. Jauhnya letak pembangkitan dan penggunaan energi listrik, sehingga listrik yang terbangkit disalurkan melalui saluran transmisi. Sebelum disalurkan melalui saluran transmisi tegangan yang keluar dari generator dinaikkan menggunakan trafo daya menjadi antara 150 kV dan 500 kV, karena saluran transmisi di Indonesia pada umumnya menggunakan level tegangan 150 kV dan 500 kV.[1]

Saluran transmisi memiliki dua jenis kategori yaitu, saluran transmisi udara dan saluran transmisi bawah tanah. Pada pembuatan Tugas Akhir ini menggunakan saluran transmisi udara dengan level tegangan 500 kV. Proses penyaluran energi listrik menggunakan saluran transmisi udara melalui konduktor yang digantung pada menara-menara saluran transmisi dengan isolator sebagai perantaraannya. Sehingga banyak faktor yang mempengaruhi dalam merencanakan saluran transmisi udara.

2.2 Konfigurasi Saluran Transmisi

Pada saluran transmisi udara, dikenal beberapa macam bentuk konfigurasi saluran. Berikut ini macam-macam bentuk konfigurasi :

- Konfigurasi saluran transmisi Horisontal
- Konfigurasi saluran transmisi Vertikal
- Konfigurasi saluran transmisi Delta

Bentuk konfigurasi horisontal biasanya digunakan untuk saluran transmisi yang memakai rangkaian tunggal, sedangkan bentuk konfigurasi vertikal dan delta biasanya digunakan untuk saluran transmisi yang memakai rangkaian ganda.

Konfigurasi horisontal ini cocok untuk sistem transmisi yang jalurnya banyak melewati daerah yang jarang penduduk karena ketinggian konduktornya lebih rendah daripada konfigurasi lainnya. Pada konfigurasi delta dengan menggunakan rangkaian tunggal ketinggian antara satu fasa dengan dua fasa lainnya berbeda, sehingga bentuknya

mirip seperti segitiga atau delta. Sedangkan pada konfigurasi vertikal ganda, konfigurasi ini sering digunakan dalam saluran transmisi karena harganya lebih ekonomis dan juga mampu mengirimkan energi listrik dengan kapasitas yang besar. Hal ini disebabkan karena kemampuan membawa penghantar konduktor transmisi lebih banyak.

2.3 Dasar Pemilihan Tegangan

Dalam menentukan tegangan pada saluran transmisi sangat terkait dengan kapasitas daya yang disalurkan. Penyaluran energi listrik dengan kapasitas daya yang besar dan dengan jarak yang jauh, banyak faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan seperti efisiensi, losses, faktor cuaca jenis konduktor, temperature, dan lain-lain. Untuk mengatasi faktor tersebut, maka dalam mentransmisikan energi listrik biasanya menggunakan level tegangan dengan tingkat yang lebih tinggi. Dengan cara seperti ini proses penyaluran daya akan lebih efektif dan rugi-rugi transmisi dapat diturunkan

Peningkatan tegangan pada saluran transmisi memiliki beberapa keuntungan sebagai berikut : [14]

- a. Untuk menyalurkan kapasitas daya yang sama, arus yang dialirkan menjadi berkurang. Dengan demikian, penggunaan konduktor penghantar bisa berkurang dengan maksud luas penampangnya bisa lebih kecil dengan bertambah tingginya tegangan.
- b. Struktur penyangga konduktor menjadi lebih kecil, karena luas penampang konduktor yang digunakan juga ikut mengecil
- c. Penurunan tegangan diujung jaringan akan lebih sedikit, karena arus yang mengalir di saluran lebih kecil.

Penggunaan tegangan pada sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan sebagai berikut : [7]

- Tegangan Ekstra Tinggi : 500 kV
- Tegangan Tinggi : 150 kV, 70 kV
- Tegangan Menengah : 20 kV, 6kV
- Tegangan Rendah : 380/220 Volt

2.4 Komponen Utama Saluran Transmisi

Komponen-komponen utama yang terdapat dalam saluran transmisi adalah :[14]

- Menara.
- Konduktor penghantar.

- Isolator.
- Kawat pembumian.

2.4.1 Menara

Menara atau Tower pada saluran transmisi adalah suatu bangunan yang digunakan untuk menopang kawat penghantar saluran transmisi udara. Penggunaan menara pada saluran transmisi udara karena energi listrik yang dilewatkan melalui saluran transmisi udara biasanya menggunakan konduktor telanjang, sehingga media isolasi yang digunakan untuk melindungi benda disekitar konduktor yaitu menggunakan media isolasi udara. Sehingga perlu diperhatikan pada saat pemasangan kawat konduktor. Pemasangan tower atau menara harus disesuaikan dengan standar dan kondisi lingkungan sekitar, dan dipastikan konstruksi bangunannya kuat guna menyangga atau merentang kawat konduktor pada jarak dan ketinggian yang aman dari aktivitas manusia dan kondisi sekitarnya.

Konstruksi menara besi baja merupakan konstruksi yang sering digunakan dalam pembuatan menara transmisi di Indonesia. Penggunaan konstruksi besi baja biasanya digunakan untuk saluran transmisi tegangan tinggi (SUTT) dan saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (SUTET), karena mudah dibangun terutama untuk didaerah pegunungan dan yang jauh dari jalan raya.

2.4.2 Konduktor Penghantar

Konduktor penghantar digunakan untuk menghantarkan energi listrik yang disalurkan. Jenis-jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5% (Cu 97,5%), dan aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%).

Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi memiliki kelemahan, yaitu untuk besar tahanan konduktor yang sama, tembaga memiliki beban yang lebih berat dan juga harganya lebih mahal dibandingkan dengan aluminium. Oleh karena itu saat sekarang banyak saluran transmisi di Indonesia yang menggunakan kawat penghantar aluminium daripada kawat penghantar tembaga. Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut :[2]

- a. AAC = All – Aluminium Conductor, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- b. AAAC = All Aluminium – Alloy Conductor, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- c. ACSR = Aluminium Conductor Steel – Reinforced, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
- d. ACAR = Aluminium Conductor Alloy – Reinforced, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat penghantar, perlu digunakan kawat penghantar yang tidak berbahan aluminium murni. Untuk saluran udara tegangan tinggi, dimana jarak antara dua tower atau menara yang jauh, dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Sehingga perlu digunakan kawat penghantar dengan jenis ACSR, karena ada kawat bajanya diinti kawat konduktor.

2.4.3 Isolator

Isolator jaringan tenaga listrik mempunyai peranan penting untuk mencegah terjadinya *short circuit* dari konduktor fasa ke bumi melalui menara serta memikul beban mekanis penghantar yang diisolasiannya. Isolator juga memiliki kemampuan untuk menghindari terjadinya kerusakan terhadap peralatan listrik akibat tegangan lebih dan loncatan bunga api. Menurut penggunaan dan konstruksinya dikenal tiga jenis isolator yaitu, isolator jenis pasak, isolator jenis pos-saluran, isolator gantung. Isolator jenis pasak dan isolator jenis pos-saluran digunakan pada saluran transmisi dengan tegangan kerja relatif rendah (kurang dari 22 - 33 kV), sedang isolator gantung dapat digandeng menjadi rentengan isolator yang jumlahnya disesuaikan kebutuhan. [6]

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.

Fungsi utama isolator adalah : [4]

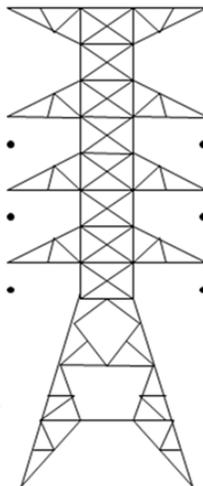
- a. Untuk penyekat atau mengisolasi antara penghantar dengan tanah dan antara penghantar dengan penghantar.
- b. Untuk memikul beban mekanis yang disebabkan oleh berat penghantar dan gaya tarik penghantar.
- c. Untuk menjaga agar jarak antar penghantar tidak berubah atau mendekat.

2.4.4 Kawat Pembumian

Kawat pembumian atau “*ground wires*” juga disebut sebagai kawat pelindung yang digunakan untuk melindungi kawat-kawat fasa terhadap sambaran petir. Kawat pembumian itu dipasang diatas kawat fasa dan yang digunakan biasanya kawat baja. Standar pemilihan tipe serta ukuran konduktor selalu mempertimbangkan faktor keamanan, sehingga pada pemilihannya akan dipilih ukuran diameter konduktor yang lebih besar. Dan juga tidak jarang digunakan kawat ACSR. [15]

2.3 Konstruksi Menara Transmisi

Tower atau menara yang digunakan untuk perencanaan saluran transmisi udara Tj. Redeb sampai Sabah adalah tower dengan jenis *lattice* tower. *Lattice* tower merupakan tower yang terbuat dari baja profil atau baja yang dilapisi anti karat, disusun sedemikian rupa sehingga menjadi suatu menara yang telah diperhitungkan kekuatannya disesuaikan dengan kebutuhannya. Menara dengan jenis *lattice* tower memiliki tiga model, tetapi model yang dipilih adalah model piramida rangkaian ganda dengan menggunakan dua kawat pembumian pada ujung paling atas menara. Berikut ini merupakan menara *lattice* model piramida bisa dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini. [16]



Gambar 2.1 Menara *Lattice* Model Piramida Sirkuit Ganda

Dalam melakukan perencanaan pada tower atau menara saluran transmisi perlu diperhatikan faktor-faktor yang berhubungan, antara lain sebagai berikut :

- Andongan (*sagging*), merupakan jarak proyeksi yang diukur dari tinggi menara saluran transmisi terhadap jarak lengkungan penghantar yang terendah. Dengan diketahuinya jarak andongan, sehingga dapat ditentukan seberapa tinggi minimum menara yang harus dibangun. Hal ini disebabkan karena konduktor penghantar yang direntangkan antara dua gawang bobotnya lumayan berat.
- Jarak bebas ke tanah (*ground clearance*), merupakan jarak minimum yang aman (bagi manusia) yang dihitung dari proyeksi tinggi suatu menara atau tower. Sehingga penduduk yang tinggal di daerah sekitar saluran transmisi tidak merasa terganggu dengan adanya bangunan menara tersebut. Jarak bebas diukur dari saluran terendah sebagai titik acuannya.
- Jarak vertikal dan horisontal antar kawat, merupakan jarak aman yang harus dipenuhi oleh suatu konstruksi menara sehingga saat sistem transmisi dioperasikan berjalan dengan baik atau aman dan memiliki keandalan yang tinggi.
- Panjang insulator set, merupakan panjang untaian insulator yang digunakan pada saluran transmisi sebagai pembawa konduktor penghantar pada jarak aman.
- Jarak vertikal kawat tanah – kawat fasa, merupakan jarak proyeksi yang diukur antara kawat fasa dan kawat tanah pada saluran transmisi.

2.3.1 Jenis dan Fungsi Menara

Tower transmisi yang digunakan pada saluran transmisi udara dari Tj. Redeb sampai Sabah yaitu tower transmisi dengan jenis *lattice* menggunakan level tegangan 500 kV yang terbuat dari baja, dengan span atau jarak antar tower antara 400 – 500 meter dengan jarak lokasi sejauh \pm 300 KM. Dalam melakukan perencanaan menara saluran transmisi perlunya diketahui berbagai macam fungsi yang dimiliki menara saluran transmisi, antara lain :

- Menara penegang (*tension tower*)
Menara penegang (*tension tower*) merupakan menara yang umumnya digunakan saat mempunyai sudut belokan pada saluran

transmisi, menara ini menahan gaya tarik yang lebih besar dan sedikit gaya berat dari konduktor-konduktor.

- Menara akhir (*dead end tower*)
Menara akhir adalah menara penegang yang direncanakan sedemikian rupa sehingga kuat untuk menahan gaya tarik konduktor-konduktor penghantar dari satu arah saja. Menara akhir ini ditempatkan di ujung saluran transmisi udara ekstra tinggi yang akan masuk ke halaman gardu induk.
- Menara penyangga (*suspension tower*)
Menara penyangga digunakan untuk menahan sepenuhnya gaya berat dari peralatan listrik ada pada menara saluran transmisi. Umumnya tidak memiliki sudut belokan.
- Menara penyekat (*section tower*)
Menara penyekat merupakan penyekat antara beberapa menara penyangga dengan beberapa menara lainnya, dengan alasan kemudahan saat pembangunan atau penarikan konduktor, dan umumnya memiliki sudut belokan yang kecil.
- Menara transposisi (*transposition tower*)
Menara transposisi merupakan menara penegang yang berfungsi sebagai tempat perubahan letak konduktor penghantar saluran transmisi dengan tujuan untuk memperbaiki impedansi saluran transmisi.
- Menara portal (*gantry tower*)
Menara portal merupakan menara yang berbentuk portal digunakan pada persilangan antara dua saluran transmisi yang membutuhkan ketinggian yang lebih rendah untuk alasan tertentu. Menara ini dibangun di bawah saluran transmisi yang sudah ada.
- Menara kombinasi (*combined tower*)
Menara kombinasi merupakan menara yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda level tegangannya.

Perencanaan konstruktif tower didasarkan atas beban tertentu, ketentuan mengenai tower ini diatur dalam standar-standar. Untuk menara baja dikenal klasifikasi berikut :

- Menara singgung (jenis A) yang dipasang menurut garis lurus, dengan bagian yang bersudut mendatar kecil antara 0° - 2° untuk menara standar.

- Menara sudut jenisnya B dan C yang dipasang dengan sudut mendatar tertentu. Jenis yang B sudutnya 0° - 20° dan yang jenis C sudutnya 10° - 20° .
- Menara ujung jenisnya D yang dipasang pada ujung semua kawat penghantar, sehingga perlu memiliki ketahanan yang besar
- Menara khusus, merupakan menara yang digunakan untuk penyeberangan sungai atau lembah.

Pada penjelasan diatas bisa dilihat pada tabel 2.1. berikut ini yang merupakan tipe-tipe dan fungsi menara saluran transmisi 500 kV.

Tabel 2.1 Tipe dan Fungsi Menara Transmisi

Tipe Tower		Fungsi	Sudut
Rangkaian Tunggal	Rangkaian Ganda		
A	AA	Suspension	$0^{\circ} - 2^{\circ}$
A R	AA R	Suspension	$0^{\circ} - 5^{\circ}$
B	BB	Tension	$0^{\circ} - 10^{\circ}$
C	CC	Tension	$10^{\circ} - 30^{\circ}$
D	DD	Tension	$30^{\circ} - 60^{\circ}$
E	EE	Tension	$60^{\circ} - 90^{\circ}$
F	FF	Dead End	$0^{\circ} - 45^{\circ}$
G	GG	Transposisi	

Sumber : PT. PLN (Persero) Saluran Udara Tegangan EkstraTinggi (SUTET)

Penggunaan tower sedapat mungkin menggunakan tower dengan tinggi standar, namun pada kondisi tertentu tinggi menara dapat ditambah maupun dikurangi. Menara dengan kaki diperpanjang biasanya digunakan pada saat saluran transmisi udara melewati sungai dan bangunan-bangunan. Untuk menara dengan kaki yang diperpendek biasanya digunakan pada saat saluran transmisi udara melewati daerah gunung atau pegunungan. Berikut ini tabel 2.2 merupakan standar dalam melakukan perpanjangan atau memperpendek kaki menara.

Tabel 2.2 Penambahan dan Pengurangan Kaki Menara

Tipe	Penambahan / Pengurangan Panjang bodi (m)
A	+4
LA	+7
B, C, R	+1

D, DR	-4, +4
H	-
Aa	-6, -3, +3, +6, +9
Bb, Cc	-6, -3, +3, +6, +9
BTb	+3
Dd, DRd	-6, -3, +3, +6
AA	+3, +6, +9, +12
BB	+3, +6, +9, +15
CC	+3, +6, +9
DD, DDR	+3, +6

Sumber : PT. PLN (Persero) Saluran Udara Tegangan EkstraTinggi (SUTET)

2.3.2 Bagian-bagian Menara

Berikut ini bagian-bagian dari menara saluran transmisi, mulai dari atas sampai bawah :

a. Pondasi, Stub, dan Halaman Tower

Pondasi merupakan konstruksi beton yang bertulang besi atau baja yang terletak dibagian bawah menara yang fungsinya untuk mengikat kaki-kaki menara dengan bumi. Jenis pondasi menara transmisi memiliki beberapa macam menyesuaikan kondisi tanah tempat menara transmisi berada, dan beban yang akan ditanggung oleh menara transmisi. Pondasi menara yang menanggung beban tarik (*tension*) dirancang lebih kuat dan besar daripada menara tipe *suspension*. Berikut ini merupakan jenis-jenis pondasi menara transmisi :

- Normal sengaja dipilih untuk daerah yang dinilai memiliki tanah cukup keras.
- Spesial atau pancang (*fabrication* dan *cassing*) digunakan untuk daerah yang lembek atau tidak keras sehingga harus diupayakan mencapai tanah keras yang lebih dalam
- *Raft* digunakan untuk pondasi yang letaknya di daerah berawa atau berair.
- *Auger* digunakan karena mudah pengerjaannya dengan mengebor dan mengisinya dengan semen.
- *Rock drilled* digunakan untuk yang kondisi tanahnya berbatu.

Untuk jenis tanah yang ada terdapat tiga jenis tanah dengan karakteristik sebagai berikut ini pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 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
Tipe pondasi yang cocok	L	M	H

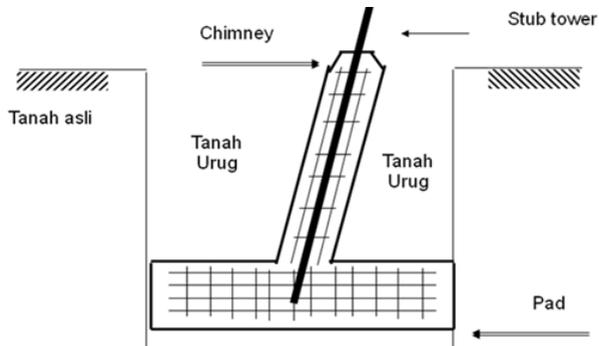
Sumber : PT. PLN (Persero) Saluran Udara Tegangan EkstraTinggi (SUTET)

Struktur tanah yang keras biasanya memiliki kadar air tanah yang sangat rendah dan mempunyai daya dukung yang tinggi untuk tempat berdirinya menara transmisi. Secara umum dapat digunakan sebagai pedoman untuk menentukan tipe pondasi menara, yang bisa disesuaikan dengan struktur tanah sebagai berikut ini pada tabel 2.4.

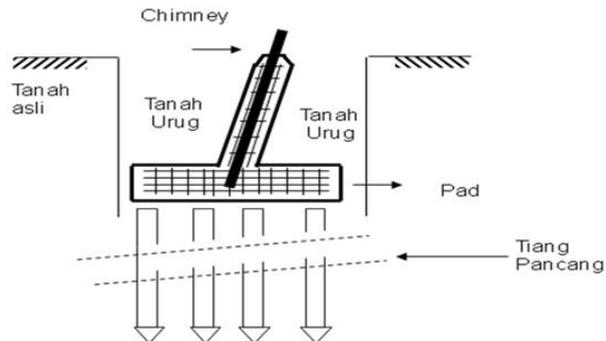
Tabel 2.4 Kondisi Tanah

Tipe Pondasi	Daerah Tanah
L	Tanah bergunung-gunung
	Hutan
	Pertanian
	Sawah
M	Pertanian dekat sungai
	Pertanian dekat dengan sawah
H	Sawah dekat sungai
	Tanah yang sangat Lembek

Stub merupakan bagian paling bawah dari kaki menara transmisi, yang dipasang bersamaan dengan pemasangan pondasi dan diikat supaya menyatu dengan pondasi. Bagian atas *stub* dimunculkan sampai ke permukaan tanah sekitar 0,5 sampai 1 meter, dan dilindungi dengan semen serta dilapisi cat agar menghindarkan dari berkarat. Berikut ini merupakan pemasangan pondasi yang normal dan pondasi special (pancang) bisa dilihat pada gambar 2.2 dan gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.2 Pondasi Normal



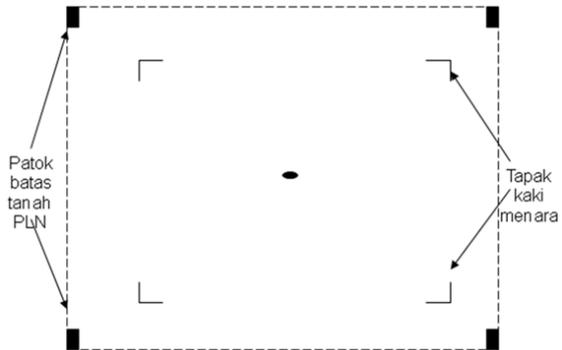
Gambar 2.3 Pondasi Spesial (Pancang)

Pemasangan *stub* merupakan paling menentukan mutu pemasangan menara, karena harus memenuhi syarat berikut :

- Jarak antar *stub* harus benar
- Sudut kemiringan *stub* harus sesuai dengan kemiringan kaki menara transmisi.
- Level titik hubung *stub* dengan kaki menara tidak boleh beda meskipun 2 mm.

Halaman menara merupakan daerah letak menara yang luasnya diukur dari proyeksi ketas tanah galian pondasi. Biasanya antara 3 hingga 8 meter di luar *stub* tergantung pada jenis menara. Berikut

ini merupakan gambar halaman menara pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Halaman Menara

b. Kaki Menara

Kaki menara merupakan yang terhubung antara *stub* dengan badan menara. Pada kondisi tanah yang tidak rata perlu dilakukan penambahan atau pengurangan tinggi kaki menara. Badan menara diharapkan harus tetap sama tinggi permukaannya. Penambahan panjang kaki ditandai dengan tanda (+), sedangkan pengurangan panjang kaki ditandai dengan tanda (-). Berikut ini merupakan kaki menara dilihat pada gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 Kaki Menara

c. *Common Body*

Common body merupakan badan menara bagian bawah yang terhubung antara kaki dengan badan menara bagian atas (*super structure*). Kebutuhan tinggi menara dapat dilakukan dengan pengaturan tinggi badan menara dengan penambahan atau pengurangan.

d. Palang (*Travers*)

Travers merupakan bagian dari menara yang dipergunakan untuk tempat menggantungkan atau mengaitkan isolator fasa serta klem konduktor petir. Pada umumnya *travers* berbentuk segitiga, kecuali menara jenis *tension* yang mempunyai sudut belokan besar maka *travers*-nya berbentuk segi empat. Kekuatan gaya tarik *travers* disesuaikan dengan kekuatan tarik dari tiang yang telah dihitung sedemikian rupa sehingga kuat terhadap gaya tarik konduktor penghantar transmisi saluran udara.

e. *Super Structure*

Super structure merupakan badan menara bagian atas yang terhubung dengan *common body* dan *traverse* konduktor fasa maupun konduktor petir. pada menara model delta tidak dikenal istilah *super structure* namun digantikan dengan *bridge* dan “K” *frame*.

2.3.3 Pembumian Menara

Menara atau tower yang terbuat dari baja merupakan konstruksi penopang saluran transmisi yang pada umumnya berdiri diatas pondasi. Selain penopang saluran transmisi, menara transmisi juga digunakan untuk menopang kawat petir dan juga sekaligus sebagai penyalur arus petir ke bumi. Supaya berfungsi secara sempurna dalam menyalurkan arus petir ke bumi, maka setiap kaki menara perlu dihubungkan ke elektrode pembumian yang juga dikebumikan di bumi. Penambahan arde pada kaki menara memiliki tujuan yaitu untuk memperkecil tahanan pembumian supaya nilai resistansinya lebih kecil tidak melebihi 10 ohm seperti standar ketentuan PLN.

Dalam menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit menuju ke gardu induk, atau dari gardu induk sat uke gardu induk lainnya, saluran transmisi melewati berbagai jenis kawasan. Dengan demikian menara-

menara penopang saluran transmisi didirikan diatas tanah yang beraneka ragam dan mempunyai tahanan jenis yang berbeda. Jenis tanah dan besar kecilnya nilai tahanan pada tanah tersebut bisa untuk menentukan jenis pentanahan kaki menara yang digunakan, bisa dilihat pada tabel 2.5 berikut ini. [17]

Tabel 2.5 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

Secara umum, jenis elektroda pembumian dibagai menjadi tiga macam yaitu :

a. Elektroda Batang (*Ground Rod*)

Elektroda batang biasanya terbuat dari pipa galvanis diameter 1,27 cm dengan panjang 2,75 m atau 5,5 m ditancapkan ke dalam tanah. Dengan tujuan sebagai penghantar arus petir dari tower ke dalam tanah. Digunakan kawat BC (*Bare Copper*) dengan ukuran 50 mm² atau 95 mm² yang salah satu ujungnya dihubungkan pada ujung bawah pipa arde. Ujung kawat BC yang bagian atas pipa dihubungkan dengan kaki menara. Untuk membuat seluruh permukaan pipa arde dapat berfungsi sebagai penyalur dan memudahkan penyebaran arus petir di dalam tanah, maka kawat arde diikat erat pada pipa arde.

b. Elektroda Pita (*Counterpoise*)

Untuk daerah tanah yang keras dan berbatu, tanah pasir yang nilai tahanan pembumiannya tinggi bisa menggunakan pembumian dengan sistem *counterpoise*. Elektroda jenis ini terbuat dari hantaran berbentuk pita, kawat atau hantaran pejal yang ditanam menyebar dari kaki menara. Kedalaman penanaman elektroda pita ini berkisar antara 0,5 – 1 meter dengan memperhitungkan kelembapan tanah ditempat tersebut. Bentuk jaringan pembumian

ini bisa berbentuk radial dengan pusat kaki menara atau juga bisa melingkar mengelilingi kaki menara atau kombinasi keduanya. Panjang elektrode ini tergantung dari besarnya tahanan jenis tanah dan kebutuhan tahanan pembumian yang diperlukan.

c. Elektroda Plat

Elektroda ini terbuat dari plat tembaga dengan tebal 2 mm, luasnya 0,5 m² hantaran BC 50 mm² dihubungkan dengan plat ini menggunakan paku keeling atau dengan mur-baut. Elektrode plat ini ditanam tegak lurus dengan kedalaman antar 1 m sampai 5 m.

2.4 Perengkapan Konduktor Penghantar

Dalam melakukan pemasangan konduktor saluran transmisi membutuhkan beberapa peralatan yang digunakan untuk penunjang terpasangnya konduktor bisa menyalurkan listrik hingga ujung jaringan. Berikut ini beberapa komponen utama sebagai penunjang konduktor saluran transmisi. [16]

2.4.1 Sambungan Penghantar (*Joints*)

Sambungan penghantar adalah material untuk menyambung konduktor yang harus mempunyai konduktivitas listrik yang baik serta kekuatan mekanis dan ketahanan (*durability*) yang tangguh. Teknik sambungan-sambungan yang biasanya dipakai adalah :

a. Sambungan dengan *press*

Sambungan dengan cara ditekan ini menggunakan dua selongsong, yaitu selongsong baja dan selongsong aluminium. Selongsong baja berfungsi untuk *steel* atau bagian dalam konduktor penghantar ACSR, sedangkan selongsong aluminium berfungsi untuk menyambung aluminium atau bagian luar penghantar konduktor ACSR. Yang kemudian akan ditekan dengan tang *press* saat melakukan penyambungannya. Berikut ini merupakan selongsong untuk penyambung konduktor penghantar pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 Selongsong Baja dan Selongsong Aluminium

b. Sambungan belit

Dalam hal ini konduktor penghantar yang akan disambung dimasukkan dalam selongsong beberbentuk bulat ekor yang kemudian dibelit beberapa kali dengan kunci belit. Sambungan belit ini banya dipakai untuk kawat penghantar dengan luas penampang kurang dari 125 mm².

c. Sambungan untuk penghantar yang berlainan

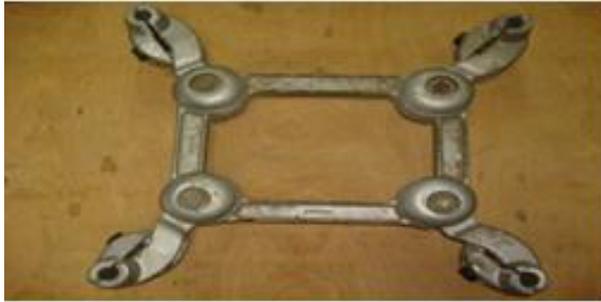
Apabila konduktor penampang berbeda jenis, yang satu tembaga dan yang satu aluminium. Sehingga digunakan selongsong tertentu sesuai dengan jenis logam tersebut, supaya konduktivitas listriknya baik.

Dalam penempatan sambungan konduktor penghantar pada saluran transmisi perlu diperhatikan hal-hal berikut ini :

- Diusahakan berada di tengah-tengah gawang dan terletak dibagian terendah dari andongan konduktor.
- Tidak boleh berada di dekat tower *tension*.
- Tidak boleh diatas jalan raya, rel kereta api, SUTT.

2.4.2 Perentang (*Spacer*)

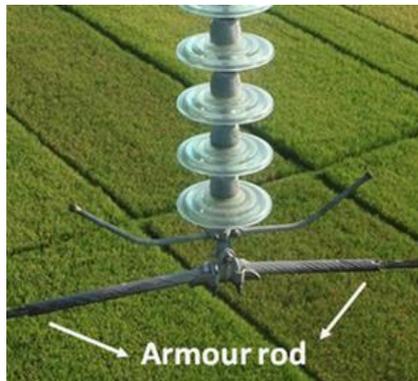
Untuk saluran transmisi yang menggunakan sistem *bundle conductor*, perlu dipasang perentang (*spacer*) yang fungsinya untuk menghindarkan agar kawat-kawat penghantar dalam satu fasa tidak mendekat atau bertumbukan karena gaya elektromekanis atau faktor angin, dan sebagai peredam getaran pada konduktor. Pada saluran transmisi *spacer* diletakkan pada jarak sekitar tiap 50 m. Berikut ini merupakan perentang untuk sistem empat *bundle conductor* pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Perentang (*Spacer*)

2.4.3 Batang-batang Pelindung (*Armour Rods*)

Pemasangan *armour rods* dengan tujuan untuk menghindarkan kelelahan dari bahan konduktor penghantar yang diakibatkan karena adanya vibrasi atau getaran pada konduktor dan akibat tekanan klem. Bentuk dari *armout rods* bisa dilihat pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Batang Pelindung

2.4.4 Peredam (*Dampers*)

Peredam dipasang di dekat penggapit (*clamp*) untuk menghindarkan kelelahan komponen kawat-kawat karena getaran. Banyak jenis peredam yang ada, berikut ini merupakan salah satu contoh peredam pada gambar 2.9.

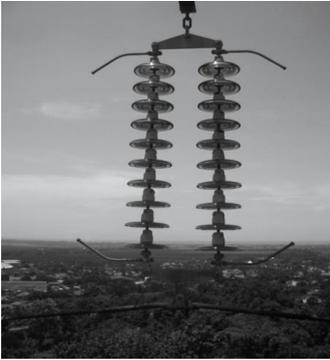


Gambar 2.9 Peredam (*Damper*)

2.5 Spesifikasi Isolator Saluran Transmisi

Isolator transmisi merupakan peralatan transmisi yang memiliki fungsi sebagai isolasi antara konduktor penghantar dengan menara transmisi. Alat ini harus mempunyai tahanan isolasi yang memenuhi syarat, yaitu mempunyai kemampun untuk menahan tegangan lebih sampai batas tertentu yang dinyatakan dengan tegangan ketahanan, yang artinya tegangan tertinggi yang dapat ditahan isolasi. Isolator juga harus mampu menahan gaya-gaya mekanis yang disebabkan oleh gaya eksternal maupun gaya berat dari berat konduktor. Jadi faktor jenis, ukuran serta jumlah isolasi yang digunkn merupakan hal-hal yang perlu untuk dipertimbangkan.

Desain isolator sangat dipengaruhi oleh faktor iklim dan teknis. Kontaminasi iklim suatu daerah dapat menurunkan kekuatan menahan tegangan pada isolator. Sehingga dalam mendesain isolator pada suatu daerah harus mempertimbangkan faktor keamanan untuk mengatasi gangguan tersebut yang dapat menyebabkan kegagalan isolator dalam menahan tegangan. Bahan yang umum digunakan untuk isolator pada transmisi udara adalah terbuat dari porselin, kaca, dan keramik.berikut ini merupakan bentuk dan penggunaan isolator bisa dilihat pada gambar 2.10. [16]



Gambar 2.10 Isolator Gantung (*Suspension*) dan Isolator Tarik (*Tension*)

2.5.1 Karakteristik Isolator

Isolator yang digunakan harus mempunyai sifat karakteristik sebagai berikut :

- Secara mekanik isolator harus mempunyai kuat mekanik untuk menanggung beban tarik konduktor penghantar maupun beban berat isolator dan konduktor penghantar.
- Secara elektrik isolator mampu menahan tegangan impuls petir pengenalan dan tegangan kerja, tegangan tembus minimum sesuai tegangan kerja.
- Permittivitas relatifnya tinggi supaya memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi.
- Tahanan isolasinya tinggi untuk mencegah kebocoran arus ke tanah.
- Bahan yang digunakan tidak boleh berlubang dan tidak boleh timbul efek apabila terjadi perubahan temperature dan pengaruh kondisi disekitar.

2.5.2 Peralatan Bantu Isolator

Peralatan pembantu yang mendukung berfungsinya isolator adalah sebagai berikut :

- *Fitting*, merupakan alat yang digunakan untuk merangkai unit-unit isolator dalam suatu rentang. Bahannya terbuat dari besi atau baja yang dilapisi anti karat.
- *Suspension clamps*, merupakan klem isolator yang terbuat dari campuran aluminium. Alat ini didesain agar pada saat

berhubungan dengan konduktor tidak terdapat lubang udara dan berfungsi sebagai klem konduktor dengan *armor rods* dan isolator.

- *Arcing Horn*, merupakan alat bantu isolator yang dipasang pada sisi dari rentengan isolator. Alat ini selain berfungsi sebagai pengaman terhadap surja hubung maupun surja petir juga berfungsi untuk meratakan distribusi tegangan pada isolator.

Jumlah maksimal isolator yang terdapat pada tiap-tiap menara diharapkan mampu menahan tegangan lebih akibat *switching* dan *lightning*. Jarak sambaran merupakan jarak aman yang harus dimiliki antara isolator dan *travers* pada kondisi diam atau berayun. Untuk level tegangan sistem hingga 220 kV biasanya ditambah satu piringan pada sebuah gandengan isolator dan untuk level tegangan hingga 400 kV biasanya ditambah dua piringan pada sebuah gandengan isolator. Berikut ini merupakan gambar *arcing horn* pada konstruksi isolator dilihat pada gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2.11 *Arcing Horn* Pada Isolator

Untuk saluran transmisi dengan level tegangan diatas 110 kV pada umumnya dipasang tanduk busur api (*arcing horn*) pada gandengan isolator yang fungsinya untuk melindungi terhadap kerusakan yang diakibatkan karena terjadinya lompatan api. Panjang sela tanduk biasanya 75% - 80% dari panjang gandengan isolator.

Jarak isolasi antara konduktor penghantar dan menara direncanakan menurut standar jarak isolasi saluran transmisi. Jarak isolasi minimum dan jarak isolasi darurat yaitu digunakan untuk menampung

kemungkinan ayunan konduktor karena angin. jarak isolasi standar adalah jarak antara konduktor penghantar dan menara yang ekuivalen dengan tegangan lompatan impuls 50% dari gandengan isolator.

Jarak isolator minimum adalah jarak ketahanan terhadap surja hubung, sedangkan jarak isolasi darurat adalah jarak yang tidak memungkinkan percikan atau lompatan (*flashover*) antara menara dan konduktor pada tegangan maksimum dan tekanan angina maksimum (40 m/s).

Untuk menara baja jenis gantung (*suspension*) jarak standar untuk isolator ditentukan oleh sudut ayun yang disebabkan oleh angin sebesar 0° - 20° , dan jarak isolasi minimum oleh sudut ayun (*swing angle*) sebesar 50° , untuk jarak isolasi darurat sudut ayunnya adalah 70° - 80° .

2.5.3 Pengotoran Isolator

Tahanan isolasi pada isolator yang permukaannya bersih nilainya sangat besar. Nilainya akan sangat berkurang menjadi beberapa ohm saja apabila permukaan dari isolator tersebut kotor oleh polusi disekitar. Karena saluran transmisi 500 kV yang terpasang biasanya terletak ditempat yang jauh dari pemukiman dan lebih dekat di daerah industri atau dekat dengan tepi laut seperti saat keluar dari PLTU. Bila tegangan kerja sistem adalah tegangan ekstra tinggi dan diterapkan pada isolator yang tahanan isolasinya rendah atau lapisan permukaan isolator yang lembab menguap maka akan menimbulkan busur api setempat, yang kemudian bertambah besar sehingga mengakibatkan terjadinya lompatan api. Mekanisme dari gejala ini sulit untuk diterangkan. Karakteristik lompatan api yang digunakan sebagai standar perencanaan didapat dari pengalaman operasi dan pemeliharaan pada saluran transmisi, serta dari data-data pengujian lompatan api pada isolator yang sengaja dikotori atau yang sudah kotor secara alami. [1]

Pada umumnya pengotoran isolator disebabkan oleh polusi kandungan garam disekitar saluran transmisi. Namun untuk memperhitungkan pengaruh bahan-bahan yang tidak dapat dilarutkan, pengujiannya dilakukan dengan garam dan serbuk poles (*polishing powder*). Klasifikasi daerah pengotoran mengenai kerusakan terhadap isolator saluran transmisi, maka daerah-daerah pengotoran diklasifikasikan menurut tabel 2.6 dibawah ini. Pembagian klasifikasi ini dipengaruhi oleh kondisi geografis letak saluran transmisi.

Tabel 2.6 Klasifikasi Daerah Pengotoran

Kasifikasi	A	B	C	D	E	F
Kepadatan	Dibawah	0,01	0,03	0,06	0,12	Diatas
Adhesi	0,01	s/d	s/d	s/d	s/d	0,25
Garam (mg/cm ²)		0,03	0,06	0,012	0,25	

Sumber : Teknik Tenaga Listrik Jilid 2, Arismunandar

Catatan :

- A, B = Pengotoran ringan
- C, D = Pengotoran sedang
- E, F = Pengotoran berat

Untuk mengatasi masalah pegotoran pada isolator yang menyebabkan penurunan tahanan isolasi terhadap tegangan lebih, dapat dilakukan dengan cara-cara berikut :

- Menambah Isolasi (misalnya saja dengan menambah jumlah piringan isolasi dalam sebuah gandengan)
- Mencuci isolator, yaitu dengan cara menyemprotkan air ke isolator. Biasanya dilakukan dalam keadaan bertegangan.
- Memberi lapisan campuran silikon pada permukaan isolator untuk menangkal air.
- Menurunkan tegangan sistem atau memutuskan arus saluran transmisi bila diperkirakan akan terjadi gangguan.

2.5.4 Pemburukan Isolator

Selama bertahun-tahun isolator terpakai pada saluran transmisi, sehingga menyebabkan berkurangnya daya isolasinya, misalnya saja karena mengalami keretakan pada porselinnya. Proses seperti ini dinamakan pemburukan isolator. Penyebab utama dari pemburukan isolator ini adalah pengembangan kimiawi dan pengembangan pembekuan dari semen, perbedaan dari pengembangan karena panas di berbagai isolator, pengembangan panas karena arus bocor dan berkaratnya pasangan-pasangan logam.

Isolator jenis pasak merupakan isolator yang paling banyak mengalami proses pemburukan sehingga sering menyebabkan gangguan pada saluran transmisi. Isolator gantung, isolator batang panjang (*long rod*), isolator *line pos* merupakan isolator yang jarang menyebabkan gangguan karena pemburukan. Dengan kemajuan teknologi, maka

Dengan dua kawat tanah *discharge* bisa ditangkap dalam jarak $2h$. oleh karena itu jika kedua kawat tanah berjarak $S = 4h$, maka objek dibawahnya tidak terkena sambaran petir secara langsung. Jika $S < 4h$, maka objek diantara dua kawat setinggi :

$$h_o = h - \frac{S}{4} \quad (2.56)$$

Akan terlindung dari sambaran petir secara langsung.

2.7 Pengaruh SUTET 500 kV Terhadap Lingkungan

Kawasan yang berada di daerah SUTET atau yang di bawahnya akan terkena dampak medan listrik dan medan magnet yang dapat berpengaruh buruk terhadap kesehatan manusia. Adanya medan listrik dan medan magnet di sekitar kehidupan manusia tidak dapat dirasakan langsung oleh indera manusia, kecuali jika intensitasnya cukup besar dan yang terasa hanya orang hipersensitif saja.

Medan magnet dan medan listrik termasuk dalam kelompok radiasi non-pengion. Radiasi ini relatif tidak berbahaya, dan berbeda dengan radiasi jenis pengion seperti radiasi nuklir atau radiasi sinar rontgen. [15]

BAB III

RENCANA JALUR TRANSMISI 500 kV TJ. REDEB - SABAH

3.1 Rencana Jalur Transmisi 500 kV

Saluran transmisi Tj. Redeb - Sabah yang direncanakan ini dilakukan sejalan dengan rencana pemerintah pada RUPTL PT. PLN (Persero) tahun 2019 – 2028 guna melakukan *ekspor* energi listrik ke Sabah Malaysia. Kegiatan pembangunan SUTET 500 kV Tj. Redeb – Sabah meliputi kegiatan pembangunan saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) 500 kV sepanjang \pm 300 KM dengan menara transmisi sebanyak \pm 750 buah. Saluran transmisi ini rencananya akan dibebani dengan kapasitas 300 MVA.

Jalur saluran transmisi tersebut sebagian besar melewati hutan karena di daerah Kalimantan hutannya masih banyak. Untuk letak jalur transmisi secara kasarnya atau bila hanya ditarik garis lurus pada peta, maka jalur tersebut melewati 3 (tiga) daerah besar yaitu provinsi Kalimantan Timur, provinsi Kalimantan Utara, dan Sabah Malaysia. Berikut ini gambar jalur transmisi menurut RUPTL PT. PLN (Persero) 2019 – 2028 secara garis lurus bisa dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini. [18]



Gambar 3.1 Rencana Jalur Transmisi Secara Garis Lurus

3.2 Kondisi Geografis Jalur Transmisi

Dalam melakukan perencanaan saluran transmisi udara, kondisi geografi mempengaruhi dalam pemilihan peralatan yang akan digunakan serta teknis pembangunan saluran transmisi. Kondisi geografis yang dibutuhkan adalah : [24]

- Tipe iklim
- Temperatur udara
- Tekanan udara
- Kelembaban udara
- Curah hujan
- Kualitas udara dan kebisingan

3.2.1 Tipe Iklim

Wilayah Kalimantan termasuk wilayah yang mempunyai iklim tropis dan mempunyai dua musim yaitu musim hujan dan musim kemarau. Pada bulan Mei sampai dengan bulan Oktober terjadi musim kemarau, dan musim penghujan terjadi pada bulan November sampai dengan bulan April. Letak wilayah Kalimantan yang di daerah katulistiwa sehingga iklim di Kalimantan juga dipengaruhi oleh angin muson. Angin muson barat biasanya pada bulan November sampai bulan April, dan angin muson timur biasanya pada bulan Mei sampai dengan bulan Oktober. Namun dalam akhir-akhir ini, keadaan musim di Kalimantan kadang tidak menentu. Bulan-bulan yang semestinya turun hujan dalam kenyataannya tidak ada sama sekali. Begitu juga sebaliknya.

3.2.2 Temperatur Udara

Suhu udara yang terjadi di wilayah Kalimantan rata-rata pada tahun 2015 adalah 27,8°C. Dengan suhu terendah adalah 23,5°C dan suhu tertinggi adalah 34,1°C dengan perbedaan temperatur udara antara siang dan malam berkisar 5°C – 7°C. Temperatur minimum terjadi di bulan Juni sampai September, Sedangkan temperatur minimum terjadi di bulan Januari sampai dengan bulan April.

3.2.3 Tekanan Udara

Tekanan udara di wilayah Kalimantan pada tahun 2015 rata-rata adalah 1012,8 Mbs. Tekanan udara terendah terjadi pada bulan Mei dan November berkisar 1012 Mbs, dan tekanan udara tertinggi terjadi pada bulan Oktober berkisar 1013,8 Mbs.

3.2.4 Kelembaban Udara

Kelembaban udara di wilayah Kalimantan pada tahun 2015 rata-rata adalah 80%. Kelembaban udara minimum terjadi pada bulan Oktober yaitu 74%, dan kelembaban udara maksimum terjadi pada bulan Mei yaitu 84%.

3.2.5 Curah Hujan

Curah hujan di wilayah Kalimantan pada tahun 2015 rata-rata adalah 174,8 mm tiap bulan. Curah hujan di musim kemarau antara bulan Mei sampai bulan Oktober berkisar antara 0 mm sampai 73,2 mm, dengan rata-ratanya adalah 127,7 mm. Curah hujan di musim penghujan antara bulan November sampai bulan April berkisar antara 60,9 mm sampai 344,8 mm, dengan rata-ratanya adalah 221,9 mm.

3.2.6 Kualitas Udara dan Kebisingan

Kualitas udara pada suatu daerah tergantung pada kondisi geografis, topografi, klimatologi, dan meteorologi daerah tersebut. Selain itu kualitas udara ini dipengaruhi juga dengan adanya pencemaran di wilayah tersebut dan sekitarnya. Untuk daerah perkotaan umumnya kualitas udara dipengaruhi oleh aktifitas domestik, baik aktifitas rumah tangga, industry, dan jumlah kendaraan. Untuk daerah lading, kebun, dan hutan pada umumnya kualitas udara hanya dipengaruhi oleh keadaan topografi, klimatologi, dan meteorologi di wilayah tersebut.

3.3 Alasan Menggunakan SUTET 500 kV

Dalam perencanaan saluran transmisi energi listrik dari Tj. Redeb sampai Sabah menggunakan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) dengan tegangan 500 kV. Pemilihan tegangan ini didasarkan pada pertimbangan berikut ini :

- a. Jarak saluran transmisi panjangnya ± 300 KM.
- b. Meminimalisir turun tegangan di ujung saluran.
- c. Dengan tegangan 500 kV masih memungkinkan untuk menyalurkan daya sebesar 750 MVA tiap sirkuit.
- d. Sebagian besar saluran transmisi melewati daerah hutan yang sedikit kepadatan penduduknya.

3.4 Kapasitas Daya Saluran Transmisi

Dalam melakukan perencanaan saluran transmisi, kapasitas daya maksimum yang bisa tersalurkan harus melebihi total daya yang direncanakan. Tujuan tersebut digunakan untuk mengantisipasi apabila terjadi penambahan beban seiring dengan berkembangnya teknologi. Untuk menentukan kapasitas daya maksimum yang bisa tersalurkan, bisa menggunakan rumus persamaan : [6]

$$Prs = \frac{V^2}{1000.L} k \quad (3.1)$$

Dimana :

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

Nilai tegangan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah nilai tegangan standar. Setiap nilai tegangan standar memiliki koefisien kapasitas yang tertentu. Korelasi antara nilai tegangan dengan koefisien kapasitas bisa dilihat pada table 3.1.

Tabel 3.1 Korelasi Tegangan Standar Terhadap Koefisien Kapasitas (k)

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

3.5 Pemilihan Jenis Konduktor

Dalam melakukan perencanaan saluran transmisi, pemilihan ukuran dan tipe konduktor merupakan hal yang penting. Ukuran dan tipe konduktor ditentukan oleh arus yang lewat, karena luas penampang konduktor penghantar berbanding lurus dengan besar arus yang melewatinya. Semakin besar arus yang mengalir maka semakin besar pula daya yang ditransmisikan melalui saluran transmisi.

Besar arus yang mengalir setiap fasanya pada perencanaan ini berdasarkan pada rumus : [7]

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V_r} \quad (3.2)$$

Dimana :

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

Setelah didapatkan hasil dari perhitungan arus tiap fasa, selanjutnya akan dihitung besar arus yang mengalir tiap konduktor dengan menggunakan rumus :

$$I_k = \frac{I}{np} \quad (3.3)$$

Dimana :

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

setelah didapat hasil perhitungan arus tiap konduktor, akan ditentukan jenis dan ukuran konduktor dengan melihat pada tabel pemilihan konduktor.

Standar pemilihan ukuran dan tipe konduktor selalu mempertimbangkan faktor-faktor keamanan, sehingga dalam menentukan pilihan akan dipilih diameter atau luas penampang yang lebih besar dari nilai perhitungan. Untuk menjamin keamanan dari sistem tersebut maka pada saat penentuan nilai kuat arus dengan menggunakan tabel katalog konduktor tersebut diambil dari harga dua tingkat di atasnya.

3.6 Penentuan *Outline Tower*

Penentuan garis besar mengenai tower dalam perencanaan saluran transmisi merupakan hal yang penting. Karena data dari *outline* ini bisa menentukan tipe tower dan jarak bebas yang bersangkutan dengan

perencanaan tower. Informasi outline tower yang dibutuhkan terdiri dari : [7]

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

Berikut ini merupakan jarak standar antar tower pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Span* Standar

Level tegangan (kV)	<i>Span</i> 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 Engineering

3.6.1 Andongan

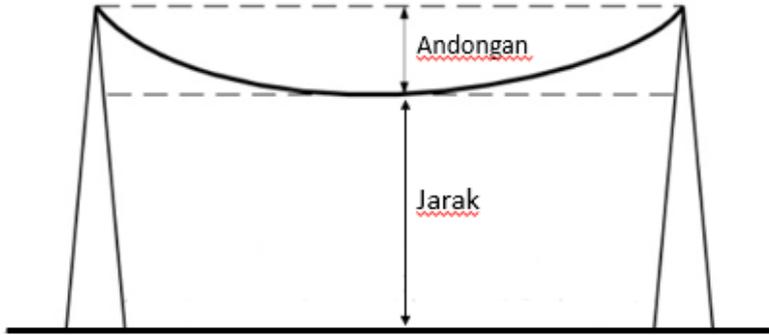
Andongan merupakan jarak proyeksi yang diukur dari tinggi menara saluran transmisi terhadap jarak lingkungan pada penghantar yang terendah. Dengan diketahui jarak andongan, maka akan ditentukan tinggi tower minimum yang harus dibangun.

Faktor yang perlu diperhatikan dalam melakukan perhitungan andongan adalah parameter pemuaihan penghantar yang disebabkan karena kenaikan suhu dari konduktor. Sehingga menyebabkan pertambahan Panjang penghantar dan juga mengakibatkan bertambah panjangnya nilai andongan sebenarnya.

Kondisi permukaan tanah yang tidak rata akan menyebabkan tower menara memiliki ketinggian yang berbeda dengan tower yang lain. Pada kondisi seperti ini perlu dilakukan metode perhitungan yang berbeda dari perhitungan andongan biasanya. Perhitungan andongan diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan kondisi menara penyangga pada saluran penghantar yaitu :

- Menara yang tingginya sama
- Menara yang tingginya berbeda

Berikut ini merupakan gambar andongan dan ruang bebas untuk saluran transmisi, bisa dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Andongan dan *Ground Clearence*

3.6.2 Andongan Kawat Fasa

Berikut ini metode perhitungan yang digunakan untuk menentukan andongan kawat fasa : [10]

a. Andongan dua menara yang sama tinggi adalah :

$$SAG_1 = \frac{W \cdot S^2}{8T} \quad (3.4)$$

$$Lo = S + \frac{W \cdot S^2}{24T^2} \quad (3.5)$$

$$Lt = Lo [1 + a(t_{max} - t)] \quad (3.6)$$

$$SAG_2 = \sqrt{\frac{3S(Lt - S)}{8}} \quad (3.7)$$

b. Andongan dua menara berbeda tinggi adalah :

$$D = \frac{W.S^2}{8T} \quad (3.8)$$

$$SAG_1 = D \left(1 - \frac{H}{4D} \right)^2 \quad (3.9)$$

$$Lo = S + \frac{W.S^2}{24.T^2} \quad (3.10)$$

$$Lt = Lo [1 + \alpha (t_{\max} - t)] \quad (3.11)$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{3S(Lt - S)}{8}} \quad (3.12)$$

$$SAG_2 = D_2 \left(1 - \frac{H}{4.D_2} \right)^2 \quad (3.13)$$

Dimana :

- W = Berat konduktor per satuan Panjang (kg/m)
- S = Panjang span (m)
- T = Tegangan mendatar penghantar (kg)
- Lo = Panjang penghantar normal (m)
- Lt = Panjang penghantar maksimal setelah mengalami pemuaian (m)
- α = Koefisien ekspansi (muai Panjang konduktor)/ $^{\circ}\text{C}$
- t_{\max} = Suhu maksimal penghantar ($^{\circ}\text{C}$)
- t = Suhu kerja penghantar ($^{\circ}\text{C}$)
- SAG₁ = Andongan normal (m)
- SAG₂ = Andongan maksimal (m)
- D₁D₂ = Variabel bantu

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

Perhitungan jarak bebas fasa ke tanah diperoleh melalui rumus sebagai berikut : [7]

$$G_c = 6,096 + ((V - 50) \times 0,0127) + 0,73(SAG_2 - SAG_1) \quad (3.14)$$

Dimana :

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

3.6.4 Penentuan Jarak Bebas Fasa ke Fasa (*Phase to Phase*)

Perhitungan jarak bebas fasa ke fasa dpat diperoleh melalui beberapa persamaan sebagai berikut : [13]

- a. Diperkirakan kenaikan tegangan yang diijinkan sebesar 5% dari tegangan nominal, sehingga V_{\max} adalah :

$$V_{\max} = 1,05 V_{L-L} \quad (\text{kV}) \quad (3.15)$$

- b. Tegangan maksimum fasa ke netral crest V_{L-N} adalah :

$$V_{L-N} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{\max} = 0,82 \times V_{\max} \quad (\text{kV}) \quad (3.16)$$

- c. *Maximum phase to phase switching over voltage* adalah :

$$V_s = k \cdot V_{L-N} \quad (\text{kV}) \quad (3.17)$$

Dimana :

K = faktor surja *switching duty* = 3 – 4,5 pu

- d. *Phase to phase over voltage duty* adalah :

$$V_o = WF \times EF \times CF \times V_w \text{ (kV)} \quad (3.18)$$

Dimana :

$EF = \text{Flashover to withstand factor} = 1,05$

$CF = \text{Electrode effect factor} = 1,05$

$WF = \text{Non standard air conditions factor} = 1,05$

e. Jarak bebas fasa ke fasa minimum (D_p) adalah :

$$V_o = 500.D_p^{0,6} \quad (3.19)$$

Untuk penentuan jarak fsa ke fasa menurut Udo T. dipakai faktor *surja switching* 3 pu dan faktor keselamatan (*safety factor*) sebesar 115 %

3.7 Perhitungan GMR dan GMD

Pada suatu *bundle conductor* biasanya terdiri dari beberapa konduktor dalam satu fasa, sehingga bisa diasumsikan sebuah konduktor dengan jari-jari ekivalen tertentu atau (Req). (Req) ini disebut dengan “jari-jari rata-rata geometrik” atau GMR (*Geometric Mean Radius*). Secara umum Req atau GMR ditentukan dengan rumus : [5]

$$Req = (n.r.R^{n-1})^{1/n} \quad (3.20)$$

Untuk perhitungan GMR bisa ditentukan seperti cara berikut ini :
Untuk $n = 2$ adalah :

$$Req = (2.r.R^1)^{1/2} \quad (3.21)$$

Untuk $n = 3$ adalah :

$$Req = (3.r.R^2)^{1/3} \quad (3.22)$$

Untuk $n = 4$ adalah :

$$R_{eq} = (4 \cdot r \cdot R^3)^{1/4} \quad (3.23)$$

Dimana :

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

Nilai R diketahui dari :

$$R = \frac{S_o}{2 \cdot \sin(\pi/n)}$$

Dalam satu tower ada dua macam rangkaian yaitu rangkaian ganda dan rangkaian tunggal, sehingga memiliki jarak antara fasa satu dengan yang lainnya. Untuk menentukan diameter ekivalen (Deq) harus mengetahui jarak antar fasa. Deq atau GMD (*Geometric Mean Distance*) merupakan suatu nilai yang menggantikan konfigurasi konduktor yang terpasang dengan sebuah jarak rata-rata, sehingga induktansi dari konfigurasi aslinya tetap sama. Berikut ini rumus yang digunakan untuk menghitung GMD : [3]

$$GMD = (S_{ab} \cdot S_{ac} \cdot S_{bc} \cdot \dots \cdot S_{xx})^{1/\text{banyaknya } S} \quad (3.24)$$

Dimana :

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

3.8 Resistansi Konduktor

Besarnya nilai tahanan suatu konduktor dapat dinyatakan dalam rumus berikut ini :

$$R = \frac{1,337 \cdot \rho \cdot L}{r^2 \cdot n} \quad (3.25)$$

Dimana :

R = Resistansi tahanan konduktor (Ω)

P = 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

Pada tegangan yang semakin tinggi maka penggunaan serat konduktor semakin banyak atau diameternya semakin lebar. Besarnya berbanding lurus dengan kapasitas arus yang mengalir. Tahanan konduktor dapat berubah karena pengaruh suhu, pada konduktor tembaga dan aluminium berlaku rumus : [12]

$$R_{t_2} = R_{t_1} [1 + \alpha_1 (t_2 - t_1)] \quad (3.26)$$

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 ($\text{m} / ^\circ\text{C}$)

Resistansi konduktor memiliki beberapa pengaruh pada saluran transmisi saat beroperasi, antara lain :

- Rugi-rugi daya karena pemanasan konduktor I^2R .
- Berkurangnya kapasitas hantar arus pada temperature yang semakin tinggi.
- Pada tegangan tinggi menimbulkan efek gelombang berjalan pada saat operasi *switching* bekerja.

3.9 Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi

Rugi-rugi daya pada saluran transmisi ekstra tinggi dipengaruhi oleh dua hal yaitu rugi tahanan dan rugi korona. Berikut ini merupakan rumus untuk menghitung rugi-rugi tahanan : [1]

$$R_t = 3.n.(I_k)^2 .R \quad (3.27)$$

Dimana :

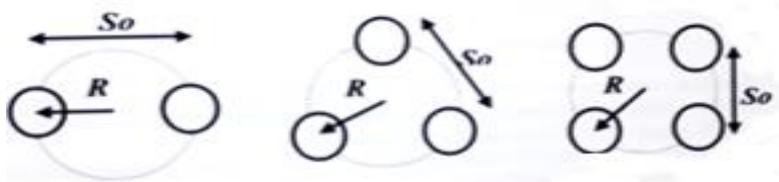
- R_t = Rugi-rugi tahanan saluran transmisi
- n = Jumlah konduktor tiap fasa
- I_k = Arus tiap konduktor
- R = Nilai tahanan resistansi kawat transmisi

3.10 *Bundle conductor* (Kawat Berkas)

Bundle conductor merupakan jenis kawat yang terdiri dari dua atau lebih dalam satu fasanya, yang masing-masing terpisah dengan jarak tertentu. Kawat berkas dapat mengurangi gejala korona saat digunakan pada saluran transmisi serta memiliki reaktansi lebih kecil dibandingkan kawat padat. Kawat berkas (*bundle conductor*) biasanya digunakan pada saluran transmisi dengan level tegangan diatas 230 kV.

Pada dasarnya *bundle conductor* digunakan untuk memperbesar luas permukaan konduktor dengan cara membagi konduktor tersebut menjadi beberapa sub konduktor dengan dimensi yang sama dan ditempatkan sepanjang keliling lingkaran. Sehingga memiliki kapasitas hantar arus yang lebih besar daripada satu konduktor

Kawat berkas dapat terdiri dari dua, empat, enam, delapan, dua belas, dan enam belas sub konduktor pada setiap fasanya dengan dimensi yang sama dan diletakkan simetris sepanjang keliing lingkaran seperti pada gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3.3 Konfigurasi *Bundle Conductor*

Pada penerapannya diperlukan pula perentang (*spacer*) yang berfungsi untuk menghindari terjadinya tumbukan antar sub konduktor karena gejala elektro mekanis atau angin. Keuntungan menggunakan beberapa konduktor dalam satu fasa bila dibandingkan dengan menggunakan konduktor tunggal dalam satu fasa adalah :

1. Mampu menyalurkan daya yang lebih besar dengan kerugian yang kecil karena bisa dicapai efisiensi yang tinggi.

2. Mempunyai induktansi dan reaktansi tiap fasa yang kecil untuk konduktor dengan material yang sama.
3. Mempunyai kapasitas tiap fasa yang lebih besar, tetapi reaktansinya lebih rendah, dan memperbesar muatan arus yang dapat memperbaiki faktor daya.
4. Mengurangi impedansi surja saluran.

Untuk menentukan R (jarak sub *bundle conductor* ke pusat lingkaran) didapat dari rumus persamaan : [11]

$$R = \frac{S_0}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (3.28)$$

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 sub *bundle conductor* ke pusat lingkaran
- S_0 = Jarak antar sub *bundle conductor*
- n = Jumlah sub *conductor*

3.11 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. Tegangan tembus udara adalah tegangan yang menyebabkan kegagalan gaya dielektik udara, pada kondisi 76 cmHg/25° C, kekuatan tahanan isolasi udara adalah 30 kV/cm. Penggunaan konduktor saluran transmisi gradien tegangan permukaan konduktor maksimal harus dibawah tahanan isolasi udara. [7]

Menurut Marks Mangele gradien tegangan permukaan *bundle conductor* dibedakan atas fasa tengah dan fasa pinggir. Untuk saluran transmisi dengan konfigurasi rangkaian ganda maka : [6]

- a. Gradien tegangan permukaan *bundle conductor* maksimal yang merupakan fasa terbawah :

$$E_{oa} = \frac{(1+(n-1)r/R)V}{n.r.\ln \frac{2H}{\operatorname{Re} q^4 \sqrt{\left(1+(2H/Deq)^2\right)\left(1+(H/Deq)^2\right)}}} \quad (3.29)$$

- b. Tegangan permukaan *bundle conductor* maksimal yang merupakan fasa tengah :

$$E_{ob} = \frac{(1+(n-1)r/R)V}{n.r.\ln \frac{2H}{\operatorname{Re} q^2 \sqrt{\left(1+(2H/Deq)^2\right)}}} \quad (3.30)$$

- c. Gradien tegangan permukaan *bundle conductor* maksimal yang merupakan fasa teratas :

$$E_{oc} = \frac{(1+(n-1)r/R)V}{n.r.\ln \frac{2H}{\operatorname{Re} q^4 \sqrt{\left(1+(2H/Deq)^2\right)\left(1+(H/Deq)^2\right)}}} \quad (3.31)$$

Dimana :

- n = Jumlah sub *bundle conductor*
- r = Jari-jari sub *bundle conductor* (m)
- R = Jarak *bundle conductor* ke pusat lingkaran (m)
- V = Tegangan fasa ke fasa maksimal (kV)
- H = Ketinggian konduktor dari permukaan tanah (m)
- Req = Jari-jari ekivalen *bundle conductor* (m)
- Deq = Jarak ekivalen *bundle conductor* antar fasa (m)

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan berdasarkan rumus diatas maka faktor gradien terbesar yang mungkin timbul adalah dari fasa tengah.

3.12 Korona Pada Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi

Korona muncul diakibatkan oleh tegangan, semakin tinggi level tegangan pada sistem maka semakin tidak bisa dihindari lagi bahwa akan terjadi korona. Oleh karena itu sangat penting diperhitungkan dalam melakukan sebuah perencanaan saluran transmisi 500 kV.

3.12.1 Proses Terjadinya Korona

Bila ada dua kawat sejajar yang terpisah dengan jarak yang cukup dekat lalu diberikan tegangan AC, maka akan terjadi korona. Korona akan terjadi secara bertahap sesuai dengan kenaikan tegangan sistem.

Korona terjadi karena ada proses ionisasi dalam udara, yaitu terlepasnya elektron-elektron dari molekul udara. Efek yang ditimbulkan dari lepasnya elektron, apabila disekitarnya terdapat medan listrik maka elektron bebas akan mengalami gaya yang mempercepat gerakannya. Sehingga akan terjadi tabrakan dengan moleku yang lain. Akibatnya akan timbul ion-ion yang baru dan elektron bebas. Proses ini berlangsung terus menerus dan jumlah ion dan elektron bebas akan bertambah bila gradien tegangan cukup besar. Peristiwa tersebut disebut dengan korona.

Ionisasi udara mengakibatkan redistribusi tegangan. Bila redistribusi ini sedemikian rupa, sehingga gradien udara diantara dua kawat lebih besar dari gradien tegangan udara normal, maka akan terjadi lompatan api. Bila hanya dari udara antara dua kawat terionisasikan, maka korona merupakan sampul mengelilingi kawat. Gradien tegangan seragam yang dapat menimbulkan ionisasi kumulatif di udara normal (25°C-760 mm/Hg) adalah 30 kV/cm. [1]

Akibat yang ditimbulkan dan gejala korona ini adalah :

- Timbul gas ozone
- Timbul rugi-rugi daya korona (*corona loss*)
- Timbul suara berisik (*audible noise*)
- Timbul gangguan pada media komunikasi (*radio interference*)

3.12.2 Tegangan Disruptive Kritis

Tegangan disruptive kritis konduktor ialah tegangan batas kritis dimana gejala korona mulai terjadi pada konduktor. Dalam melakukan perencanaan saluran transmisi hendaknya tegangan disruptive kritis ini

nilainya harus diatas tegangan kerja konduktor, karena untuk mengurangi terjadinya efek korona.

Untuk kekuatan ionisasi udara sangat bervariasi berdasarkan dengan kondisi atmosfer. Selain itu juga berhubungan erat dengan faktor kerapatan relatif udara yang didefinisikan sebagai berikut : [7]

$$\delta = \frac{3,9211p}{273 + t} \quad (3.32)$$

Dimana :

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

p = Tekanan barometer (cmHg)

t = Temperatur sekeliling (°C)

Hubungan antar tegangan kritis udara yang dibutuhkan untuk mulai terjadinya ionisasi dengan tegangan disruptive kritis adalah :

$$V_0 = \frac{E_0}{2.r.\ln(D/r)} \quad (3.33)$$

Dalam cuaca yang cerah, pada suhu sekeliling sekitar 25°C dan tekanan atmosfer 76 cmHg, sehingga diperoleh nilai teganga kritis udara adalah $V_0 = 21,1$ kV/cm, maka :

$$E_0 = 21,1.r.\ln(D/r) \quad (3.34)$$

Dimana :

E_0 = Tegangan disruptive kritis (kV/cm)

r = Jari-jari konduktor (cm)

D = Jarak antar konduktor-konduktor (cm)

Selanjutnya tegangan disruptive kritis yang dipergunakan dalam perhitungan yaitu menurut Peek : [13]

$$E_0 = 2110.\delta.m_o.r.\ln(D_{eq}/R_{eq}) \text{ kV / Fasa} \quad (3.35)$$

Dimana :

- E_0 = Tegangan disruptive kritis (kV/Fasa)
- δ = Faktor kerapatan relatif udara (cmHg/°C)
- m_0 = Faktor permukaan konduktor ($0 < m \leq 1$)

Untuk mengetahui berapa nilai faktor permukaan konduktor bisa dilihat pada tabel 3.3 Berikut ini.

Tabel 3.3 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

3.12.3 Rugi Daya Korona

Menurut Peek, rugi daya korona dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$P_c = \frac{241}{\delta} (f + 25)^{1/2} (V - V_0) \times 10^{-5} \text{ kW/km} \quad (3.36)$$

Sedangkan Peterson dalam mengajukan suatu persamaan Emprlis untuk menentukan rugi korona pada cuaca cerah untuk konduktor tiap fasa ialah :

$$P_c = \frac{0,000111}{\left(\ln \frac{2S}{d} \right)^2} f \cdot V^2 \cdot F \quad (3.37)$$

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 yang ditentukan dari percobaan dan merupakan fungsi perbandingan V/V_0

F merupakan konstanta yang dapat diketahui dengan cara membandingkan nilai tegangan fasa ke netral dengan nilai tegangan V_0 , yang hasilnya dapat dilihat pada tabel 3.4 berikut ini.

Tabel 3.4 Fungsi Rugi Daya (F)

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
1,6	1,7
1,8	3,1
2,0	6,0

Sumber : Turan Gonen, Electrical Of Power Transmission System Engineering

3.12.4 Tegangan Surja Switching dan Critical Flashover

Penentuan tegangan *flash over* kritis (V_{CFO}) dan surja *switching* (V_w) diperlukan dalam perencanaan saluran transmisi yang khususnya dalam melakukan penentuan isolasi dan dapat ditentukan dengan beberapa persamaan berikut : [11]

- Perkiraan kenaikan tegangan yang diijinkan adalah 5% dari tegangan nominal sehingga :

$$V_{\max} = 1,05 V_{L-L} \quad (\text{kV}) \quad (3.38)$$

- Tegangan maksimal fasa ke netral,

$$V_{L-N} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{\max} = 0,82 \times V_{\max} \text{ (kV)} \quad (3.39)$$

c. Tegangan *withstand switching surge crest*,

$$V_w = k \cdot V_{L-N} \text{ (kV)} \quad (3.40)$$

Dimana :

k = Faktor surja *switching withstand*

$k = 2 - 2,8$ pu

d. Tegangan critical flashover V_{CFO} ,

$$V_{CFO} = WF \times EF \times CF \times V_w \text{ (kV)} \quad (3.41)$$

Dimana :

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

CF = *Electrode effect factor* = 1,05

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

3.13 Perencanaan Isolasi Saluran Transmisi

Pada sistem transmisi tenaga listrik sangat dimungkinkan timbulnya tegangan lebih yang disebabkan oleh kilat dan *switching*. Tegangan ini hubungannya erat dengan isolasi. Pada perencanaan salura transmisi sangat penting mempertimbangkan jenis serta jumlah isolasi yang akan digunakan.

Langkah-langkah dalam melakukan perencanaan isolasi adalah sebagai berikut : [2]

- Data masukan berupa tegangan sistem (kV), konfigurasi saluran yang dipilih (horosontal atau vertikal), tipe insulator yang dipilih (tipe string I atau string V).
- Penentuan tegangan *flashover lightning* (tegangan *critical flashover*) V_{CFO} dan tegangan *flashover switching* (tegangan *withstand switching surge crest*).
- Perhitungan koefisien keamanan k_1 (koefisien keamanan fasa tengah) dan k_2 (koefisien keamanan fasa pinggir) sebagai berikut :

Memerlukan data masukan yaitu tegangan sistem (kV), tipe string (I atau V), kontaminasi (K_{tm}%), kondisi cuaca hu (%), perhitungan korona yang tergantung tipe string :

String berbentuk V : CR = 5%

String berbentuk I :

Dengan :

Isolator gandeng : CR = 13%

Tanpa isolator gandeng : CR = 10%

Penentuan tingkat kontaminasi (K_{tm})

Tingkat kontaminasi menunjukkan derajat berat polusi. Tabel 3.5 menunjukkan korelasi antara tingkat kontaminasi dengan presentase penurunan ketahanan tegangan isolator (Standar IEC 815).

Tabel 3.5 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%

Sumber : Standar IEC 815

Kekuatan isolator dalam menahan tegangan dipengaruhi oleh kondisi cuaca disekitar (hu). Di Indonesia terdapat dua musim cuaca yaitu kondisi cerah dan kondisi hujan. Saat kondisi cerah tidak ada pengaruh bagi isolator, tetapi saat kondisi hujan penurunan kekuatan isolator dalam melakukan isolasi dapat menurun hingga 5%

Ketentuan penyimpangan standar Ps

Penyimpangan standar adalah faktor kemanan yang sengaja diberikan untuk mengantisipasi penyimpangan yang mungkin terjadi.

Ditentukan Ps = 5%

- Perhitungan k₁ (koefisien keamanan fasa tengah) adalah :

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

- Perhitungan k₂ (koefisien keamanan fasa pinggir) adalah :

Untuk string berbentuk I adalah :

$$k_2 = k_1 - 0,11$$

Untuk string berbentuk V adalah :

$$k_2 = k_1 - 0,05$$

d. Khusus untuk perhitungan saluran dengan konfigurasi horizontal harus melalui proses berikut :

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

$$V_{FLTL} = (1 + k_1) V_{CFO} \quad (3.42)$$

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

$$V_{FLTS} = (1 + k_1) V_w \quad (3.43)$$

e. Setelah itu dilanjut dengan perhitungan berikut : (baik horosontal maupun vertikal)

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

$$V_{FLPL} = (1 + k_2) V_{CFO} \quad (3.44)$$

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

$$V_{FLPS} = (1 + k_2) V_w \quad (3.45)$$

f. Perhitungan jumlah isolator optimal

Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui berapa jumlah isolator yang mampu menahan tegangan lebih akibat *switching* dan petir pada daerah tertentu. Berikut ini langkah-langkahnya :

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

Dari grafik tegangan kritis flash over terhadap jumlah insulator jis tipe I atau tipe V sehingga bisa ditentukan jumlah isolator tiap fasanya. Untuk string tipe : I ganda maka jis = 2 x jis. Perhitungan dalam menentukan panjang isolator adalah :

$$D(i) = I(i) \times Jis(i) \quad (3.46)$$

Dimana :

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

Untuk mengetahui jarak sambaran dapat dicari dengan mengetahui kerapatan udara dengan asumsi sepanjang jalur homogen dan kondisi cuaca dengan suhu °C dan kelembapan udara normal, maka jarak sambaran adalah :

$$SFP = D \times Hs \times \delta \quad (3.47)$$

Dimana :

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

Lalu untuk menentukan jarak *arcing horn* fasa pinggir adalah :

$$GFP = \frac{SFP - 0,021}{1,115} \quad (3.48)$$

Dimana :

GFP = Jarak arcing horn (m)
 SFP = Jarak sambaran (m)

3.14 Pentanahan Kaki Menara

Untuk melindungi kawat fasa terhadap sambaran langsung dari petir digunakan satu atau dua kawat tanah yang terletak diatas konduktor penghantar dengan sudut perlindungan lebih kecil dari 18°. Dengan demikian kemungkinan terjadinya loncatan api karena sambaran petir secara langsung bisa diabaikan.

Kemungkinan terjadinya loncatan balik (*back flashover*) karena sambaran kilat secara langsung pada kawat tanah tetap masih ada. Tahanan kaki pada menara harus dibuat tidak melebihi 10 ohm, dengan menggunakan batang pengetanahan (*ground rod*) atau sistem *counterpoise*. Kondisi atau jenis tanah tempat menara transmisi berdiri memiliki pengaruh terhadap nilai pentanahan menara.

Untuk menghitung tahanan kaki menara dapat diketahui dengan rumus : [9]

$$R = \frac{P}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{d} \right) \quad (3.49)$$

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, tahanan kaki menara akan berkurang dengan menambah Panjang batang pentanahan. Tetapi hubungan ini tidak langsung dan akan mencapai satu titik dimana penambahan panjang batang pengetanahan hanya akan mengurangi sedikit nilai tahanan pentanahan. Untuk mengurangi nilai tahanan pentanahan secara signifikan dilakukan dengan cara memparalelkan batang pengetanahan.

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 (2.49). 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 :

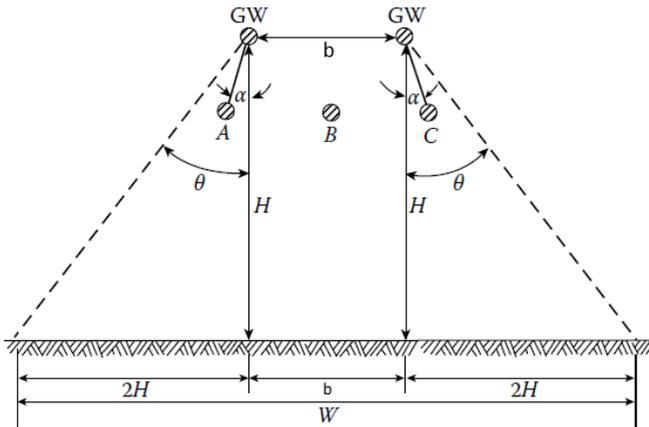
r = jari-jari dari masing-masing batang pengetanahan (harus sama)

α = jarak antara batang pengetanahan

3.15 Penangkapan Kilat oleh Saluran Transmisi

Pada saluran transmisi udara dapat dikatakan membentuk bayang-bayang listrik pada tanah yang berada dibawah saluran transmisi itu. Karena saluran transmisi terdapat menara yang tingginya lebih dari 50 m dan sering tersambar petir ketika terjadi hujan. Kilat yang biasanya menyambar tanah didalam bayang-bayang itu, akan menyambar saluran transmisi sebagai gantinya. Sedangkan kilat yang diluar bayang-bayang itu, sama sekali tidak menyambar saluran transmisi. [8]

Berikut ini merupakan bayang-bayang listrik untuk sebuah saluran transmisi bisa dilihat pada gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3.4 Lebar Jalur Perisaian Terhadap Sambaran Kilat

Lebar bayang-bayang W adalah :

$$W = (b + 4h^{1.09}) \text{ meter} \quad (3.50)$$

Dimana :

- b = jarak pemisah antara kedua kawat tanah, meter (bila kawat tanah hanya satu, $b = 0$)
- h = tinggi rata-rata kawat tanah diatas tanah = $h - 2/3$ andongan, meter
- h_t = tinggi kawat tanah pada menara, meter

Sesuai dengan keadaan geografis jalur saluran transmisi, Whitehead telah membagi lintasan tersebut dalam tiga kategori yaitu : datar, bergelombang, dan bergunung-gunung. Tinggi rata-rata kawat diatas tanah untuk ketiga kategori listasan tersebut adalah :

a. Tanah datar :

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

b. Tanah bergelombang :

$$h = h_t$$

c. Tanah bergunung-gunung :

$$h = 2h_t$$

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

$$A = 100(km)(b + 4h^{1.09})10^3 (km)$$

Atau,

$$A = 0,1(b + 4h^{1.09}) km^2 \text{ per } 100 \text{ km saluran} \quad (3.51)$$

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

Jumlah sambaran kilat ke bumi nilainya sebanding dengan jumlah hari guruh per tahun atau “*Iso Keraunic Level*” (IKL) ditempat itu. Banyak para penyalidik yang memberikan perhatian ke arah ini dan mengemukakan rumus-rumus yang berlainan. Rumus-rumus tersebut bisa dilihat pada tabel 3.6.

Untuk di Indonesia menggunakan :

$$N = 0,015 \text{ IKL} \quad (3.52)$$

Tabel 3.6 Relasi Empiris Antara Kerapatan Sambaran Kilat dan Hari Guruh Tahunan

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 ± 0,2 × 10 ⁻³ b = 1,9 ± 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	0,13 IKL	Brooks (1950)

	(iklim tropis)		
--	----------------	--	--

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

Sumber : T. S. Hutauruk, 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 :

$$N_L = N.A \quad (3.53)$$

Atau,

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

3.17 Radius Efektif Kawat Tanah dan Kawat Fasa dengan Korona

Pada saluran transmisi tegangan tinggi, terutama pada saluran transmisi tegangan ekstra tinggi serig digunakan yang namanya kawat berkas (*bundle conductor*). Supaya mudah dalam melakukan analisa, kawat-kawat berkas itu direduksi menjadi kawat tunggal ekuivalen. Setelah itu perlu dicari radius korona apabila ada tegangan yang cukup tinggi pada kawat itu. Dalam masalah kawat tanah, radius korona tersebut bisa lebih dari satu meter, dan pengaruhnya pada tegangan induksi pada kawat fasa mungkin sangat berarti.

Sama halnya untuk kawat fasa, amplop (*envelope*) korona yang timbul bila kawat tersebut disambar kilat, bisa sangat besar dan ini memperbaiki penampilan terhadap kegagalan perisaian.

3.17.1 Radius Efektif Kawat Tanah dengan Korona

Pada umumnya kawat tanah terdiri dari kawat tunggal, sehingga radius dari amplop korona dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini :

$$R \cdot \ln \left(\frac{2h_t}{R} \right) = \frac{V}{E_0} \quad (3.54)$$

Dimana :

- R = radius amplop korona (m)
- h_t = tinggi kawat diatas tanah pada menara (m)
- V = tegangan yang diterapkan pada kawat (kV)
- E₀ = batas gradien korona, dimana amplop korona tidak dapat lagi timbul (kV/m)

Untuk perhitungan lompatan api balik (*back flashover*) besar tegangan yang diterapkan diambil 1,8 kali tegangan lompatan api isolator pada 2 mikro detik. Pada perhitungan kegagalan perisaian, besar tegangan yang diterapkan itu diambil 1,8 kali tegangan lompatan api isolator pada 6 mikro detik. Besar tegangan lompatan api dari gandengan isolator dapat diperoleh dari persamaan 3.6 dengan harga E₀ biasanya digunakan 1500 kV/m atau 15 kV/cm maka :

$$V_{50\%} = \left(K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \right) \times 10^3 \text{ kV} \quad (3.55)$$

Dimana :

- K₁ = 0,4 W
- K₂ = 0,71 W
- W = panjang gandengan isolator (m)
- t = waktu tembus atau waktu lompatan api isolator (mikro detik)

Amplop korona itu hanya berpengaruh pada kapasitansi kawat, sedangkan pengaruh pada induktansi kawat sangat kecil dan biasanya diabaikan.

3.17.2 Radius Efektif Kawat Berkas dengan Korona

Pada saluran transmisi udara dengan tegangan ekstra tinggi, konduktor fasanya biasanya menggunakan kawat berkas (*bundle conductor*). Untuk kawat berkas, dengan adanya sub konduktor

menyebabkan pengurangan yang sangat besar pada diameter korona efektif dari tiap sub konduktor :

$$r_{eki} = \sqrt[N]{r_1 d_{12} d_{13} \dots \dots d_{1N}} \quad (3.56)$$

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 (3.7) untuk menghitung radius amplop, ketinggian kawat adalah tinggi rata-rata dari atas tanah, demikian juga untuk menghitung kegagalan perisaian, tinggi kawat tanah maupun kawat fasa adalah tinggi rata-rata.

3.18 Impedansi Surja Kawat dan Impedansi Surja Menara

Seperti yang dikatakan diawal, amplop korona bisa mengubah kapasitansi kawat, tetapi tidak mengubah induktansinya. Radius efektif dari kawat tunggal adalah harga rata-rata geometris dari radius kawat tanpa korona dan radius kawat dengan korona. Sehingga impedansi surja kawat tunggal dengan memperhitungkan pengaruh korona adalah :

$$Z_m = 60 \sqrt{\ln \frac{2h_t}{r} \cdot \ln \frac{2h_t}{R}} \quad (3.57)$$

Dimana:

- Z_{mn} = impedansi surja sendiri kawat n, (ohn)
- 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 :

$$Z_g = \frac{Z_{11} + Z_{22} + Z_{12}}{4} \quad (3.58)$$

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 :

$$Z_g = \frac{Z_{11} + Z_{12}}{2} \quad (3.59)$$

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

$$Z_\phi = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r_{eki}} \cdot \ln \frac{2h}{R_c}} \quad (3.60)$$

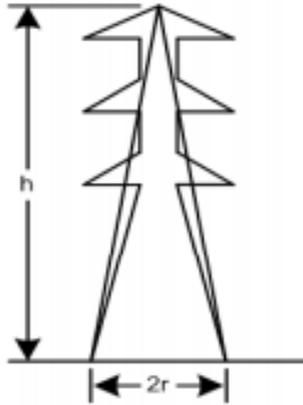
Dimana :

h = tinggi rata-rata kawat fasa diatas tanah (m)

r_{eki} = radius ekuivalen kawat berkas (m)

R_c = radius korona kawat berkas (m)

Menurut Sargent dan Daveniza, impedansi surja menara bisa dihitung berdasarkan penampang menara transmisi. Penampang transmisi yang digunakan dalam perencanaan saluran transmisi ini menggunakan menara transmisi jenis piramida. Berikut ini gambar penampang transmisi yang digunakan bisa dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Penampang Menara Transmisi

Untuk menghitung impedansi menara, bisa menggunakan persamaan berikut ini,

$$Z_t = 30 \cdot \ln \left(\frac{2(h^2 + h \cdot r^2)}{r^2} \right) \quad (3.61)$$

Dimana :

- Z_t = impedansi menara (ohm)
- h = tinggi menara mulai dari ujung sampai tanah (m)
- r = jarak antar kaki-kaki menara (m)

3.19 Kegagalan Perisaian

Kira-kira mulai tahun 1920 banyak teori percobaan-percobaan dan pengalaman-pengalaman dikemukakan para penyidik mengenai fungsi kawat tanah untuk melindungi konduktor penghantar pada saluran transmisi dari sambaran petir. pada tahun 1960, Provoost mengemukakan suatu resume yang sangat bai mengenai peran kawat tanah. Berdasarkan teori tersebut, Provoost menarik 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

Kemudian, Konstenko, Polory, dan Rosenfeld pada tahun 1961 menunjukkan bahwa jumlah gangguan petir karena kegagalan perisaian adalah sebagai fungsi dari sudut perisaian θ dan tinggi menara h_t seperti yang terlihat pada relasi empiris dengan persamaan :

$$\log \phi = \frac{\theta \sqrt{h_t}}{90} - 4 \quad (3.62)$$

Dimana :

- ϕ = hasil bagi dari jumlah kilat yang mengenai kawat fasa dan jumlah kilat yang mengenai saluran transmisi
- θ = sudut perisaian pada menara ($^{\circ}$)

Whitehead mendasari teori elektromeometris menara dan jarak sambaran petir yang besarnya bergantung pada arus petir. Jadi, Whitehead mengemukakan dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$S = 8.I^{0.65} \text{ m} \quad (3.63)$$

Dimana :

- S = jarak sambaran (m)
- I = arus petir (kA)

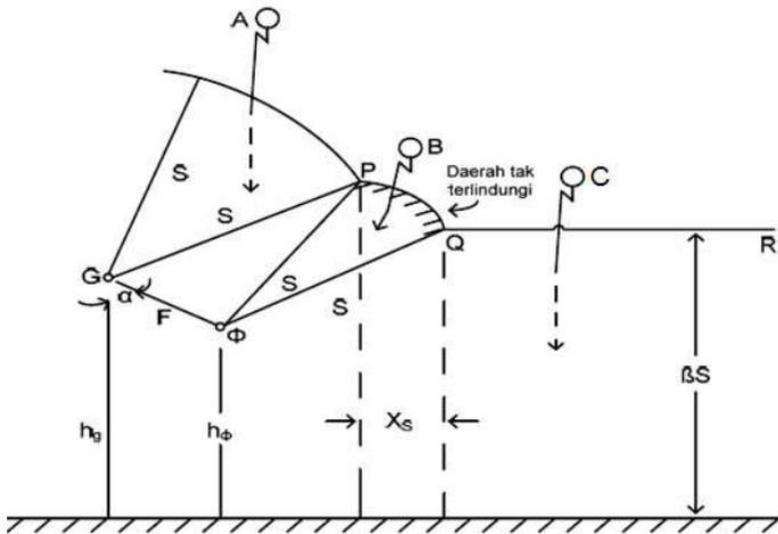
Sebelum menghitung S, dihitung dahulu nilai arus petir minimum yang menyambar kawat fasa yang dapat menimbulkan lompatan api pada isolator dengan persamaan berikut,

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

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 3.6.



Gambar 3.6 Perisaian Tidak Sempurna

Koefisien β memiliki kecenderungan yang kuat, bahwa jarak sambaran akhir dari petir ke bumi dan digunakan dalam memperkirakan jarak sambaran yaitu βS . Harga koefisien β oleh Anderson diungkapkan oleh angka-angka sebagai berikut :

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

X_s adalah daerah yang tidak terlindungi dari sambaran petir secara langsung. Persamaan lebar daerah yang tidak terlindungi bisa dilihat pada persamaan dibawah ini,

Bila $\beta S > Y_\phi$,

$$X_s = S (\cos \theta + \sin (a_s - \omega)) \quad (3.64)$$

Dengan,

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\beta S - Y\phi}{S} \right)$$

$$\omega = \cos^{-1} \left(\frac{F}{2S} \right)$$

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

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

$$X_s = S (1 + \sin (a_s - \omega)) \quad (3.65)$$

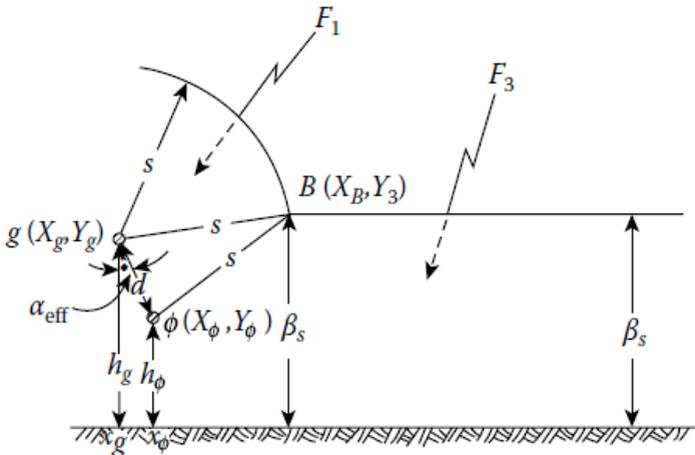
Bila perisaian sempurna, X_s menjadi 0, sehingga sudut perisaian menjadi,

$$a_s = \tan^{-1} \left(\frac{X_G}{Y_\phi - Y_G} \right) \quad (3.66)$$

Dengan,

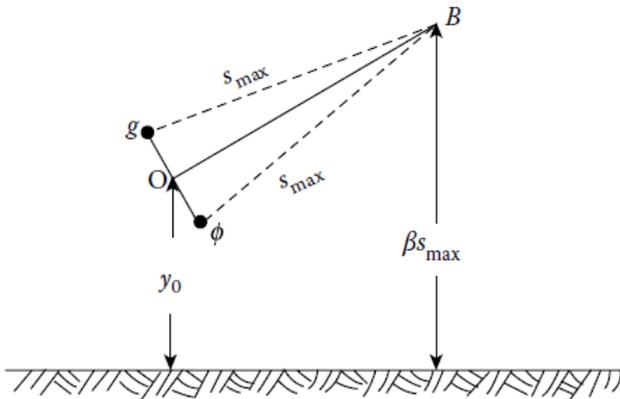
$$X_G = \left[S^2 - (\beta S - Y_\phi)^2 \right]^{1/2} - \left[S^2 - (\beta S - Y_G)^2 \right]^{1/2}$$

Berikut ini merupakan gambar perisaian yang sempurna atau efektif, bisa dilihat pada gambar 3.7 dibawah ini.



Gambar 3.7 Perisaian Sempurna

Menurut teori elektrogeometris hanya nilai arus-arus yang berada di luar daerah I_{min} dan I_{max} yang dapat menyebabkan kegagalan perisaian. S_{max} adalah jarak sambaran maksimum. 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 3.8 dibawah ini.



Gambar 3.8 Cara Menentukan Harga Y_0 untuk Memperoleh S_{max}

Jadi,

$$S_{\max} \approx BO = Y_0 \left| \frac{B_s - \sqrt{B_s^2 + A_s C_s}}{A_s} \right| \quad (3.67)$$

Dengan,

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

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

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

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

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

Disebutkan bahwa 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 menghitung jumlah kegagalan perisaian. Probabilitas arus melebihi arus tertentu adalah menggunakan persamaan :

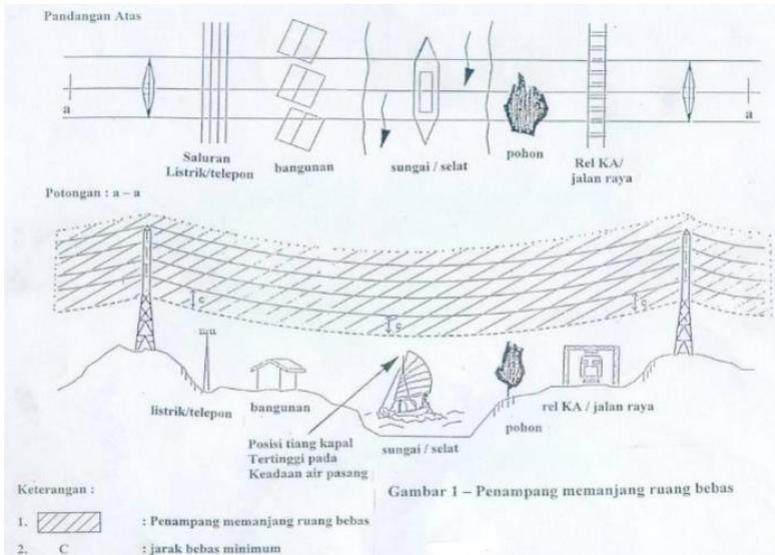
$$P_l = e^{-I/34} \quad (3.68)$$

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 :

$$N_{SF} = 0,015 \text{ IKL} \frac{X_s}{2} (P_{\min} - P_{\max}) \quad (3.69)$$

3.20 Ruang Bebas

Peraturan Menteri ESDM No. 01.P/47MPE/1992 memberikan gambaran ruang bebas untuk saluran transmisi, bisa dilihat pada gambar 3.9 dibawah ini. [21]



Gambar 3.9 Ruang Bebas Disekitar Menara

Berikut ini tabel 3.7 merupakan jarak bebas minimum antara penghantar SUTET dengan tanah dan benda lain.

Tabel 3.7 Jarak Bebas Minimum SUTET

No	Lokasi	SUTET 500 kV (m)	
		Sirkuit ganda	sirkuit tunggal
1	Lapangan terbuka	10	11
2	Daerah dengan keadaan tertentu		
2.1	Bangunan tidak tahan api	14	15
2.2	Bangunan tahan api	8,5	8,5
2.3	Lalu lintas jalan atau jalan raya	15	15
2.4	Pohon-pohon pada umumnya, hutan, perkebunan	8,5	8,5
2.5	Lapangan olahraga	14	15

2.6	SUTT lainnya, penghantar udara tegangan rendah, jaringan telkom antena radio, antena televisi, dan kereta gantung	8,5	8,5
2.7	Rel kereta biasa	15	15
2.8	Jembatan besi, rangka besi, penahan penghantar, kereta listrik terdekat	8,5	8,5
2.9	Titik tertinggi tiang kapal pada kedudukan air pasang atau tertinggi pada lalu lintas air	8,5	8,5

Sumber : Peraturan Menteri ESDM No. 01.P/47/MPE/1992

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB IV

PERENCANAAN DAN DESAIN SALURAN TRANSMISI 500 kV TJ. REDEB – SABAH SEHUBUNGAN DENGAN EKSPOR ENERGI LISTRIK

4.1 Pemilihan Konfigurasi Saluran Transmisi

Untuk menentukan konfigurasi saluran transmisi, perlu diketahui daya total yang akan disalurkan. Berdasarkan RUPTL PT. PLN (Persero) 2017 – 2028 total daya yang disalurkan adalah 300 MVA. Sedangkan untuk daya maksimum yang bisa disalurkan oleh saluran transmisi Tj Redeb sampai Sabah adalah :

Dengan asumsi power faktor : 0,85

$$P_{rs} = \frac{V^2}{1000.L} k$$

$$P_{rs} = \frac{(500)^2}{1000.300} 800 = 666,67 \text{ MW}$$

$$P_{rs} = 666,67 \div 0,85 = 784,32 \text{ MVA / sirkit}$$

Ternyata jika menggunakan satu sirkit horizontal kemampuan saluran transmisi untuk menyalurkan energi listrik masih diatas kemampuan yang direncanakan oleh RUPTL. Tetapi berdasarkan RUPTL PT. PLN (Persero) 2017 – 2028 kebutuhan energi listrik tumbuh rata-rata 6,42%, sehingga dipilih sirkit verikal ganda yang digunakan dalam perencanaan saluran transmisi ini. Hal ini dimaksudkan untuk keperluan jangka panjang, dimana kapasitas penggunaan energi listrik semakin lama semakin meningkat. Dan juga untuk menjaga keandalan jaringan transmisi, apabila salah satu dari saluran ada yang terputus atau terjadi gangguan, sehingga satu saluran yang lain masih bisa menyalurkam energi listrik.

Untuk menyalurkan energi listrik pada saluran transmisi ini menggunakan *bundle conductor*, dengan tujuan untuk meningkatkan kapasitas daya saluran transmisi. Digunakannya *bundle conductor* pada

saluran transmisi ini karena, tegangan yang digunakan adalah tegangan AC dengan level tegangan 500 kV, sehingga akan timbul *skin effect*. Yang artinya, pada sistem tegangan tinggi AC arus akan mengalir pada permukaan konduktor. Hal ini disebabkan karena kerapatan fluks pada permukaan konduktor lebih kecil dari pada inti konduktor, sehingga reaktansi induktif pada inti konduktor lebih besar dari pada permukaan konduktor. Tingginya reaktansi dibagian inti konduktor memaksa sebagian besar arus mengalir melalui permukaan konduktor.

4.2 Ukuran dan Tipe Konduktor Saluran Transmisi

Rencana daya yang dialirkan sebesar 300 MVA menggunakan saluran vertikal ganda. Tetapi kapasitas maksimal daya yang disalurkan pada saluran transmisi adalah 784,32 MVA. Perhitungan arus dilakukan berdasarkan daya maksimum yang akan disalurkan, maka perhitungan nilai arusnya adalah sebagai berikut,

Kapasitas arus yang mengalir :

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \\
 &= \frac{300 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 500 \text{ KV}} \\
 &= \frac{300000000 \text{ VA}}{\sqrt{3} \times 500000 \text{ V}} = 346,41 \text{ A per fasa}
 \end{aligned}$$

Pada perencanaan saluran transmisi kali ini, menggunakan *bundle conductor* sebanyak 4 buah sub konduktor, sehingga arus yang mengalir pada setiap sub konduktor adalah,

Arus untuk *bundle conductor* dengan $np = 4$, adalah :

$$\begin{aligned}
 I_k &= \frac{I}{np} \\
 &= \frac{346,41}{4} = 86,6 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Dengan faktor keamanan 110% maka :

$$I_k = 1,1 \times 86,6 = 95,26 \text{ A}$$

Menurut perhitungan diatas, bisa menggunakan konduktor ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) 26/7 dengan luas permukaan konduktor adalah 70 mm² dengan diameter = 1,2 cm atau jari-jari = 0,6 cm yang memiliki kuat hantar arus 287 A.

Tetapi pada peraturan menteri perindustrian republik Indonesia nomor 15/M-IND/PER/3016 tentang “STANDAR SPESIFIKASI DAN STANDAR HARGA TOWER TRANSMISI DAN KONDUKTOR PRODUK DALAM NEGERI DALAM RANGKA PERCEPATAN PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR KETENAGALISTRIKAN” pada pasal 3 menyatakan bahwa spesifikasi konduktor paling rendah menggunakan ACSR 240/40 (*Aluminium Conductor Steel Reinforced* dengan luas penampang 240 milimeter persegi) yang mengacu pada SPLN 41-7:1981.

Sehingga pada perencanaan ini menggunakan konduktor ACSR 26/7 dengan luas penampang 240 mm² dengan diameter = 2,1 cm atau jari-jari = 1,05 cm yang memiliki kuat hantar arus 638 A. Menggunakan konduktor dengan jenis ACSR karena, bagian inti konduktor ini berupa kawat baja yang mempunyai kekuatan mekanik tinggi, sedangkan bagian permukaannya mempunyai konduktifitas tinggi.

4.3 Menghitung Andongan (*Sagging*)

Dalam perencanaan saluran transmisi perlu diperhitungkan nilai andongan kawat penghantar, supaya dapat menentukan jarak proyeksi yang diukur dari ketinggian menara saluran transmisi terhadap jarak lengkungan penghantar yang terendah, agar SUTET yang akan dibangun tidak mengganggu lingkungan atau aktivitas yang berada dibawah saluran transmisi. Hal tersebut bertujuan karena, beratnya penghantar yang direntangkan antara dua tiang transmisi, dan bisa saja terjadi pemuaiian yang disebabkan kenaikan suhu dari lingkungan sekitar.

Perhitungan andongan diklasifikasikan menjadi dua jenis perhitungan berdasarkan kondisi menara penyangga pada saluran transmisi, yaitu :

- Menara yang tingginya sama
- Menara yang tingginya berbeda

Standar jarak antar menara yang digunakan adalah sebesar 400 meter untuk SUTET 500 kV seperti pada tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Satandar *Span*

Level Tegangan (kV)	<i>Span</i> standar (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) diperoleh dari katalog SPLN 41-7:1981, beratnya = 980 kg/km = 0,98 kg/m
- Kuat tarik dari kawat penghantar T (kg) dari katalog SPLN 41-7:1981 diperoleh $T = 8811$ kg
- Panjang *span* S (meter) dari data standar *span* untuk tegangan transmisi 500 kV dipilih $S = 400$ m (dilihat pada tabel 4.1)
- Koefisien ekspansi (muai panjang) konduktor α ($^{\circ}\text{C}$) dari SPLN 41-7:1981 diperoleh untuk kawat jenis ACSR, $\alpha = 0,0000189/^{\circ}\text{C}$
- Suhu maksimum (t_m) dan suhu normal (t), di daerah Kalimantan menurut Badan Pusat Statistik (BPS) diperoleh $t_m = 35^{\circ}\text{C}$ dan $t = 23^{\circ}\text{C}$

Maka andongan saluran transmisi adalah :

- Untuk dua menara yang tingginya sama (kondisi andongan normal ; $t = 23^{\circ}\text{C}$)

Maka,

$$\begin{aligned}
 SAG_1 &= \frac{W \cdot S^2}{8T} \\
 &= \frac{0,98 \cdot (400)^2}{8.8811} \\
 &= 2,2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

(andongan maksimal ; $t_m = 35^\circ\text{C}$)

Maka,

$$\begin{aligned} L_o &= S + \frac{W \cdot S^2}{24T^2} \\ &= 400 + \frac{0,98 \cdot (400)^2}{24 \cdot (8811)^2} \\ &= 400,00008 \text{ m} \approx 400 \text{ m} \end{aligned}$$

Lalu,

$$\begin{aligned} Lt &= L_o [1 + a(t_{max} - t)] \\ &= 400 [1 + 0,0000189(35 - 23)] \\ &= 400,09 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi,

$$\begin{aligned} SAG_2 &= \sqrt{\frac{3S(Lt - S)}{8}} \\ &= \sqrt{\frac{3 \cdot 400(400,09 - 400)}{8}} \\ &= 3,7 \text{ m} \end{aligned}$$

- b. Untuk dua menara yang tingginya berbeda
Dengan asumsi beda tinggi antar menara $H = 1$ meter
(kondisi andongan normal ; $t = 23^\circ\text{C}$)
Maka,

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{W.S^2}{8T} \\
 &= \frac{0,98(400)^2}{8.8811} \\
 &= 2,2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi,

$$\begin{aligned}
 SAG_1 &= D \left(1 - \frac{H}{4D} \right)^2 \\
 &= 2,2 \left(1 - \frac{1}{4.2,2} \right)^2 \\
 &= 1,73 \text{ m}
 \end{aligned}$$

(andongan maksimal ; $t_m = 35^\circ\text{C}$)

Maka,

$$\begin{aligned}
 L_o &= S + \frac{W.S^2}{24.T^2} \\
 &= 400 + \frac{0,98.(400)^2}{24.(8811)^2} \\
 &= 400,00008 \text{ m} \approx 400 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Lalu,

$$\begin{aligned}
 L_t &= L_o [1 + a(t_{max} - t)] \\
 &= 400 [1 + 0,0000189(35 - 23)] \\
 &= 400,09 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Dan,

$$\begin{aligned}
 D_2 &= \sqrt{\frac{3S(Lt - S)}{8}} \\
 &= \sqrt{\frac{3.400(400,09 - 400)}{8}} \\
 &= 3,7 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jadi,

$$\begin{aligned}
 SAG_2 &= D_2 \left(1 - \frac{H}{4D_2} \right)^2 \\
 &= 3,7 \left(1 - \frac{1}{4 \cdot 3,7} \right)^2 \\
 &= 3,2 \text{ m}
 \end{aligned}$$

4.4 Penentuan Jarak Bebas Konduktor Jaringan SUTET 500 kV (*Clearance*)

Jarak bebas *bundle conductor* tiap fasa ke tanah dipengaruhi oleh ketinggian benda-benda konduktif dibawah saluran transmisi, berikut ini perhitungan penentuan jarak bebas antara konduktor dengan tanah :

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

$$\begin{aligned}
 G_c &= 6,096 + ((V - 50) \times 0,0127) + 0,73(SAG_2 - SAG_1) \\
 &= 6,096 + ((500 - 50) \times 0,0127) + 0,73(3,7 - 2,2) \\
 &= 12,9 \approx 13 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

Untuk selanjutnya penambahan tinggi konduktor tergantung daerah yang dilewati saluran transmisi berdasarkan pada tabel 3.7.

- b. Perhitungan jarak bebas *bundle conductor* dengan *bundle conductor* lainnya antar fasa :

Pada SUTET 500 kV Tj. Redeb sampai Sabah V_{L-L} nominal sebesar 500 kV. Perhitungan jarak bebas *bundle conductor* dengan *bundle conductor* lain antar fasa dapat ditentukan melalui rumusan Udo T. sebagai berikut :

- Tegangan sistem maksimum

$$\begin{aligned} V_{\max} &= 1,05 \times V_{L-L} \\ &= 1,05 \times 500 = 525 \text{ kV} \end{aligned}$$

- Tegangan maksimum *line to netral crest*

$$\begin{aligned} V_{L-N} &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_{\max} \\ &= 0,816 \times 525 = 429 \text{ kV} \end{aligned}$$

- *Maximum phase to phase switching over voltage duty*

$$\begin{aligned} V_s &= K \times V_{L-N} \\ &= 3 \times 429 = 1287 \text{ kV} \end{aligned}$$

- *Phase to phase over voltage duty*

$$\begin{aligned} V_o &= WF \times EF \times CF \times V_s \\ &= 1,05 \times 1,05 \times 1,05 \times 1287 = 1489,9 \text{ kV} \end{aligned}$$

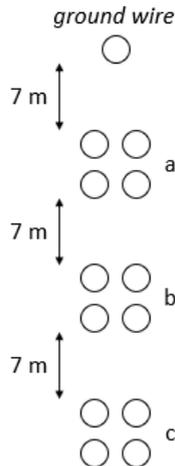
- Jarak bebas *bundle conductor* minimum

$$\begin{aligned} V_o &= 500 \times D_p^{0.6} \\ 1489,9 &= 500 \times D_p^{0.6} \\ D_p &= 6,17 \text{ m} \end{aligned}$$

Sehingga jarak bebas *bundle conductor* dengan *bundle conductor* lainnya dengan memperhitungkan faktor keamanan sebesar 115% maka :

$$1,15 \times 6,17 = 7,09 \approx 7 \text{ m}$$

Jarak bebas *bundle conductor* dengan *bundle conductor* lainnya dipengaruhi juga oleh menara transmisi dan panjang isolator yang membawa konduktor penghantar. Jarak pisah antar fasa dalam satu sirkit adalah 7 meter. Sebagai pelengkap maka untuk jarak antara kawat tanah dengan konduktor fasa teratas dianggap berjarak sekitar 7 meter. Sedangkan jarak rentang konduktor dalam satu menara menurut peraturan Menteri ESDM No.18 tahun 2015 adalah 16 meter. Berikut ini gambar jarak bebas jaringan SUTET 500 kV bisa dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1 Jarak Bebas Konduktor Dan Kawat Tanah

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

Untuk perhitungan spasi sub *bundle conductor* dalam satu fasa dapat diperoleh dari persamaan Andrew S. Timscheff dalam makalah IEEE *trans on power system & app* 1971 berjudul *calculation of gradien for phase on three phase bundle conductor line* :

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

Dimana :

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

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

n = jumlah sub *bundle conductor*

S_o = spasi antar sub *bundle conductor* (m)

Jika diketahui S = 7 m ; r = 1,05 cm = 0,0105 m ; n = 4 maka :

$$\text{Ln} \frac{7}{\sqrt[4]{0,0105 \times 4 \left[\frac{S_o}{2 \sin(\pi/4)} \right]^{4-1}}} = \frac{S_o}{2 \times 4 \times 0,0105 \times \sin \pi/4} + \frac{(4-1)}{4}$$

$$\text{Ln} \left[(7) / (0,35 S_o^{3/4}) \right] = \frac{S_o}{0,059} + 0,75$$

$$\text{Ln} (20/S_o^{3/4}) = 16,95 S_o + 0,75$$

$$2,99 - \text{Ln} S_o^{3/4} = 16,95 S_o + 0,75$$

$$\text{Ln} S_o^{3/4} + 16,95 S_o - 2,24 = 0$$

Misalkan $S_o^{3/4} = \varepsilon^x$; sehingga : $S_o = \varepsilon^{(4/3)x}$

Bila $y = (4/3)x$; maka : $S_o = \varepsilon^y$

$$f(y) = \ln(\varepsilon^x) + 16,95 \varepsilon^y - 2,24$$

$$f(y) = x + 16,95 \varepsilon^y - 2,24$$

$$f(y) = \frac{3}{4}y + 16,95 \varepsilon^y - 2,24$$

$$f(y) = 3y + 67,8 \varepsilon^y - 8,96$$

Maka,

$$f(y) = y + 22,6 \varepsilon^y - 2,99$$

&

$$f'(y) = 1 + 22,6 \varepsilon^y$$

Melalui metode iterasi Newton Rhapsion dapat diperoleh :

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

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

$$f(-0,5) = -0,5 + 22,6 \varepsilon^{-0,5} - 2,99 = 10,2176$$

$$f'(-0,5) = 1 + 22,6 \varepsilon^{-0,5} = 14,7076$$

$$y_1 = -0,5 - \frac{10,2176}{14,7076} = -1,1947$$

Pada iterasi kedua ($n = 1$) dengan harga $y = -1,1947$ maka :

$$f(-1,1947) = -1,1947 + 22,6 \varepsilon^{-1,1947} - 2,99 = 2,6585$$

$$f'(-1,1947) = 1 + 22,6 \varepsilon^{-1,1947} = 7,8432$$

$$y_2 = -1,1947 - \frac{2,6585}{7,8432} = -1,5337$$

Pada iterasi ketiga (n = 2) dengan harga y = -1,5337 maka :

$$f(-1,5337) = -1,5337 + 22,6 \varepsilon^{-1,5337} - 2,99 = 0,3519$$

$$f'(-1,5337) = 1 + 22,6 \varepsilon^{-1,5337} = 5,8756$$

$$y_3 = -1,5337 - \frac{0,3519}{5,8756} = -1,5936$$

Pada iterasi keempat (n = 3) dengan harga y = -1,5936 maka :

$$f(-1,5936) = -1,5936 + 22,6 \varepsilon^{-1,5936} - 2,99 = 0,0086$$

$$f'(-1,5936) = 1 + 22,6 \varepsilon^{-1,5936} = 5,5922$$

$$y_4 = -1,5936 - \frac{0,0086}{5,5922} = -1,5951$$

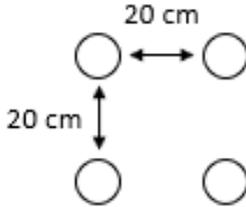
Pada iterasi kelima (n = 4) dengan harga y = -1,5951 maka :

$$f(-1,5951) = -1,5951 + 22,6 \varepsilon^{-1,5951} - 2,99 = 0,0002$$

$$f'(-1,5951) = 1 + 22,6 \varepsilon^{-1,5951} = 5,5853$$

$$y_5 = -1,5951 - \frac{0,0002}{5,5853} = -1,5951$$

Dengan diperolehnya nilai y yang sama pada iterasi keempat dan kelima, yaitu = -1,5951. Maka nilai tersebut merupakan hasil perhitungan iterasi yang terakhir. Sehingga jarak antar sub *bundle conductor* hasilnya diperoleh : $S_0 = \varepsilon^y = \varepsilon^{-1,5951} = 0,2029 \text{ m} = 20 \text{ cm}$. Berikut ini gambar 4.2 merupakan gambar jarak antar sub *bundle conductor*.



Gambar 4.2 Jarak Antar Sub *Bundle Conductor* Tiap Fasa

4.6 Perhitungan Jari-jari Ekivalen *Bundle Conductor* ($R_{eq} = GMR$)

Jari-jari ekivalen (R_{eq}) *bundle conductor* merupakan jari-jari lingkaran geometris antar sub *bundle conductor* dengan sub *bundle conductor* lainnya pada setiap *bundle conductor* satu fasa. Nilai dari jari-jari ekivalen setiap *bundle conductor* untuk 4 sub *bundle conductor* adalah sebagai berikut :

$$R_{eq} = (4 \cdot r \cdot R^3)^{1/4} = \left(4 \times 1,05 \times \left(\frac{20}{\sqrt{2}} \right)^3 \right)^{1/4} = 10,44 \text{ cm}$$

4.7 Perhitungan GMD

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

- Jarak (S) a-b, b-c, a'-b', b'-c' = 7 m
- Jarak (S) a-c, a'-c' = 14 m
- Jarak (S) a-b', b-a', b-c', c-b' = $\sqrt{16^2 + 7^2} = 17,5 \text{ m}$
- Jarak (S) a-c', c-a' = $\sqrt{16^2 + 14^2} = 21,3 \text{ m}$

Maka nilai GMD adalah sebagai berikut :

$$GMD = \sqrt[12]{S_{ab} \cdot S_{bc} \cdot S_{ac} \cdot S_{a'b'} \cdot S_{b'c'} \cdot S_{a'c'} \cdot S_{ab'} \cdot S_{ac'} \cdot S_{ba'} \cdot S_{bc'} \cdot S_{cb'} \cdot S_{ca'}}$$

$$GMD = \sqrt[12]{(7)(7)(14)(7)(7)(14)(17,5)(21,3)(17,5)(17,5)(17,5)(21,3)}$$

$$GMD = 12,8 \text{ m}$$

4.8 Perhitungan Resistansi *Bundle Conductor*

Luas penampang konduktor ACSR yang digunakan mempunyai luas serat sebesar 240 mm², dengan susunan 26AL / 7St dengan asumsi arus hanya mengalir pada serat aluminium (26 serat). Maka,

$$\text{Luas serat} : 240 \text{ mm}^2 / 26 = 9,2 \text{ mm}^2 = 9,23 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

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

$$r = \sqrt{\frac{9,23 \times 10^{-6}}{\pi}} = 1,7 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,17 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

Reistivitas aluminium = $\rho = 2,7 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$, pada suhu 23°C

Koefisien muai panjang = $a = 0,0000189 / ^\circ\text{C}$, pada suhu 23°C

Melalui persamaan berikut maka reistansi *bundle conductor* adalah :

Pada suhu 23°C,

$$R_{23^\circ\text{C}} = \frac{1,337 \cdot \rho \cdot L}{r^2 \cdot n}$$

$$R_{23^\circ\text{C}} = \frac{1,337 \times 2,7 \times 10^{-9} \times 300000}{(0,17 \times 10^{-2})^2 \times 26}$$

$$R_{23^\circ\text{C}} = 14,413 \Omega/\text{m} = 0,014413 \Omega/\text{km}$$

Pada suhu 35°C,

$$R_{35^\circ\text{C}} = R_{23^\circ\text{C}} \times (1 + a(t_2 - t_1))$$

$$R_{35^\circ\text{C}} = 0,014413 \times (1 + 0,0000189(35 - 23))$$

$$R_{35^\circ\text{C}} = 0,014416 \Omega/\text{km}$$

4.9 Rugi Daya Saluran Transmisi

Rugi daya yang dipengaruhi oleh tahanan saluran transmisi untuk sub *bundle conductor* ($n = 4$), dapat diperoleh sebagai berikut :

$$R_i = 3.n.(I_k)^2.R$$

$$R_i = 3 \times 4 \times (225,17)^2 \times 0,014416$$

$$R_i = 8769,134 \text{ W/km} = 8,769 \text{ kW/km}$$

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. Tegangan tembus udara adalah tegangan yang menyebabkan kegagalan gaya dielektik udara, pada kondisi 76 cmHg/25° C, kekuatan tahanan isolasi udara adalah 30 kV/cm. Penggunaan konduktor saluran transmisi gradien tegangan permukaan konduktor maksimal harus dibawah tahanan isolasi udara.

Untuk *bundle conductor* ($n = 4$) diperoleh data sebagai berikut :

- $R = 0,2/\sqrt{2} = 0,14 \text{ m}$
- $V_{L-L \text{ MAX}} = 525 \text{ kV}$
- $GMD = 12,8 \text{ m}$
- $n = 4$
- $r = 1,05 \text{ cm} = 0,0105 \text{ m}$
- $Req = 10,44 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Pada perhitungan ini diambil contoh jarak yang paling jauh yang berada dibawah dari saluran transmisi yaitu pada saat melewati bangunan tidak tahan api. Ketinggian fasa terbawah adalah 15 m, sedangkan jarak bebas antara fasa terbawah ke tanah adalah 13 m. Sehingga jarak minimal ketinggian konduktor fasa ke tanah adalah 28 m. Berikut ini perhitungan tegangan maksimum permukaan konduktor :

- a. Gradien tegangan permukaan *bundle conductor* maksimum yang merupakan fasa terbawah ($H = 28 \text{ m}$) adalah :

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

$$E_{oa} = \frac{(1 + (4-1)0,0105/0,14)525}{4 \times 0,0105 \times \ln \frac{2 \times 28}{0,1^4 \times \sqrt{\left(1 + (2 \times 28/12,8)^2\right) \left(1 + (28/12,8)^2\right)}}$$

$$E_{oa} = 1410,38 \text{ kV/m} = 14,1 \text{ kV/cm}$$

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

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

$$E_{ob} = \frac{(1 + (4-1)0,0105/0,14)525}{4 \times 0,0105 \times \ln \frac{2 \times 35}{0,1^2 \times \sqrt{\left(1 + (2 \times 35/12,8)^2\right)}}$$

$$E_{ob} = 2145,21 \text{ kV/m} = 21,5 \text{ kV/cm}$$

- c. Konduktor c pada ketinggian ($H = 42$) dari tanah, gradien tegangan permukaan bundle conductor maksimum pada fasa yang teratas adalah :

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

$$E_{oc} = \frac{(1 + (4-1)0,0105/0,14)525}{4 \times 0,0105 \times \ln \frac{2 \times 42}{0,1^4 \times \sqrt{\left(1 + (2 \times 42/12,8)^2\right)\left(1 + (42/12,8)^2\right)}}$$

$$E_{oc} = 1456,12 \text{ kV/m} = 14,6 \text{ kV/cm}$$

Tegangan permukaan kawat bundle conductor nilainya yang terbesar terdapat pada fasa tengah yaitu sebesar 21,5 kV/cm, sehingga masih dibawah tegangan tembus udara yaitu 30 kV/cm.

4.11 Tegangan Disruptive Kritis

Tegangan disruptive kritis dihitung menggunakan persamaan menurut Peek adalah :

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

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

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

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

Karena yang digunakan $n = 4$, maka tegangan disruptive pada cuaca cerah dengan 4 sub bundle conductor dengan faktor permukaan konduktor (m_o) = 0,9 (untuk perencanaan), $\text{Re } q = 0,1 \text{ m}$, dan $\text{De } q = 12,8 \text{ m}$ adalah sebagai berikut :

$$E_0 = 2110 \cdot \delta \cdot m_o \cdot R_{eq} \cdot \ln \left(D_{eq} / R_{eq} \right) \text{ kV/fasa}$$

$$E_0 = 2110 \times 1 \times 0,9 \times 0,1 \times \ln \left(\frac{12,8}{0,1} \right)$$

$$E_0 = 921,4 \text{ kV/fasa}$$

Sehingga tegangan disruptive kritis yang memungkinkan terjadinya korona masih diatas dari tegangan kerja sistem yaitu 500 kV tiap fasa.

4.12 Rugi Daya Korona

Menurut persamaan yang dinyatakan oleh Peterson bahwa, rugi daya korona pada tiap fasa *bundle conductor* adalah sebagai berikut :

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

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

Dengan F = 0,05 (pada tabel 2.3) dan f = 50 Hz, maka :

$$P_c = \frac{0,000111}{\left(\ln \frac{2 \times 7}{0,021} \right)^2} \times 50 \times \left(500 / \sqrt{3} \right)^2 \times 0,05$$

$$P_c = 0,546951 \text{ kW/km} = 547 \text{ W/km} \text{ tiap fasa}$$

Maka untuk rugi daya korona pada ketiga fasanya adalah = $3 \times 547 = 1641 \text{ W/km}$

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya maka dapat dianalisa untuk tegangan disruptive kritis konduktor dengan memperhatikan hal sebagai berikut :

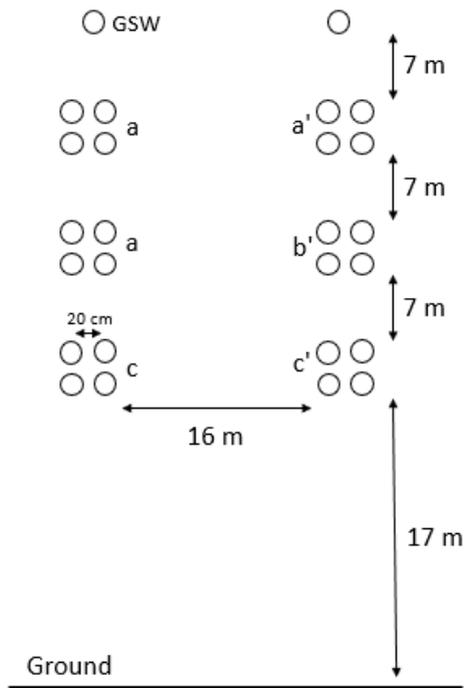
- Tegangan disruptive kritis konduktor merupakan tegangan kritis dimana gejala korona terjadi pada konduktor. Sehingga, untuk penggunaan konduktor pada saluran transmisi, tegangan disruptive kritis hendaknya diatas tegangan kerja konduktor (500 kV tiap fasa) untuk mengurangi terjadinya efek korona.
- Tegangan tembus udara yaitu tegangan yang menyebabkan gagalnya gaya dielektrik udara, pada kondisi 76 cmHg/25°C tegangan tembus udara adalah 30 kV/cm. Pada penggunaan konduktor konduktor transmisi, gradien tegangan permukaan konduktor harus dibawah dari tegangan tembus udara.

4.13 Perencanaan Konduktor Saluran Transmisi 500 kV Tj.Redeb sampai Sabah

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

- Jenis sirkit : Vertikal ganda
- Kapasitas sirkit : 1568,64 MVA
- Jenis *bundle conductor* : ACSR
- Ukuran *bundle conductor* : 240 mm²
- Diameter *bundle conductor* : 2,1 cm
- Nomor konduktor : 26/7
- Kuat hantar arus : 638 A
- Jumlah sub *bundle conductor* : 4
- Jarak normal antar menara : 400 m
- Jarak normal andongan : 2,2 m
- Jarak bebas minimal fasa ground : 17 m
- Jarak bebas minimal fasa-fasa : 7 m
- Jarak rentang konduktor dalam satu menara : 16 m
- Spasi antar sub *bundle conductor* : 20 cm
- Jari-jari ekivalen (Req) : 10,44 cm
- Diameter ekivalen (Deq) : 12,8 m
- Resitansi total *bundle konduktor* : 0,014413 Ω/km
- Gradien tegangan permukaan maksimum : 21,5 kV/cm
- Tegangan disruptive kritis konduktor : 921,4 kV/fasa
- Rugi akibat korona : 1641 W/km
- Rugi tahanan *bundle conductor* : 8769,134 W/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 mempergunakan *bundle conductor* dengan empat sub *bundle conductor*. Berikut ini perencanaan konfigurasi konduktor dari hasil perhitungan bisa dilihat pada gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.3 Konfigurasi Konduktor Hasil Perhitungan

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 SUTET 500 kV dengan Benda Lain

No	Lokasi	SUTET 500 kV (m)
		Sirkuit ganda
1	Lapangan terbuka	10
2	Daerah dengan keadaan tertentu	
2.1	Bangunan tidak tahan api	14
2.2	Bangunan tahan api	8,5
2.3	Lalu lintas jalan atau jalan raya	15
2.4	Pohon-pohon pada umumnya, hutan, perkebunan	8,5
2.5	Lapangan olahraga	14
2.6	SUTT lainnya, penghantar udara tegangan rendah, jaringan telkom antena radio, antena televisi, dan kereta gantung	8,5
2.7	Rel kereta biasa	15
2.8	Jembatan besi, rangka besi, penahan penghantar, kereta listrik terdekat	8,5
2.9	Titik tertinggi tiang kapal pada kedudukan air pasang atau tertinggi pada lalu lintas air	8,5

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

Dalam sistem tenaga sangat dimungkinkan terjadinya tegangan lebih. Tegangan lebih tersebut dapat disebabkan oleh *lightning* dan *switching*. Berkenaan dengan tegangan lebih tersebut, sangat erat hubungannya dengan isolasi. Isolasi yang terpasang pada saluran transmisi harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan lebih sampai batas tertentu. Oleh sebab itu dalam perencanaan saluran transmisi perlu juga dipertimbangkan jenis, ukuran, serta jumlah isolator yang akan digunakan. 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 (500 kV), sehingga :

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

$$V_{\max} = 1,05 \times 500 = 525 \text{ kV}$$

- Tegangan maksimum fasa ke netral :

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

$$V_{L-N} = 0,82 \times 525 = 430,5 \text{ kV}$$

- Tegangan Withstand *switching surge crest* V_w :

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

$$V_w = 2,5 \times 430,5 = 1076,25 \text{ kV}$$

- Tegangan *critical flashover* V_{CFO} :

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

$$V_{CFO} = 1,05 \times 1,05 \times 1,05 \times 1076,25 = 1245,9 \text{ kV}$$

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

- b. Data masukan berupa :

- Tegangan saluran transmisi sebesar 500 kV
 - Konfigurasi yang digunakan adalah vertikal ganda
 - Tipe isolator yang akan digunakan adalah isolator dengan konfigurasi *string* tipe V, dengan pertimbangan bahwa isolator konfigurasi *string* tipe V memiliki kelebihan yaitu konstruksinya lebih stabil apabila diterpa angin dibandingkan dengan isolator konfigurasi *string* tipe I. Dan dari sudut kontaminasi, isolator konfigurasi *string* tipe V memiliki kemampuan *self cleaning*.
- c. Penentuan tegangan *flashover lightning* dan tegangan *flashover switching* telah diperoleh dari perhitungan diatas yaitu :
- Tegangan *critical flashover* V_{CFO} : 1245,9 kV
 - Tegangan Withstand *switching surge crest* V_w : 1076,25 kV
- d. Perhitungan koefisien keamanan (k_1 dan k_2)

Kemudian dihitung koefisien keamanan dengan langkah-langkah, dan data masukan sebagai berikut :

- Tegangan saluran transmisi sebesar 500 kV
- Tipe *string* dipilih berbentuk V, maka CR = 5%
- Tingkat kontaminasi (ktm) = 20% (asumsi tingkat kontaminasi kategori medium, karena dilihat dari kondisi dibangunnya saluran transmisi ini) seperti yang tertera pada tabel 4.3 dibawah ini.

Tabel 4.3 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%

Penentuan presentasi penurunan kekuatan isolator ditentukan berdasarkan cuaca yang ada di Indonesia, yaitu cerah atau hujan. Untuk kali ini dipilih cuaca hujan (Ps = 5%) untuk penyimpangan standarnya. Dengan tujuan faktor keamanan untuk mengantisipasi penyimpangan-penyimpangan yang terjadi.

Dengan data-data yang telah tersedia, maka dapat dihitung :

Koefisien keamanan fasa tengah (k₁) :

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

$$k_1 = 5\% + 20\% + 0\% + 5\% = 0,3$$

Koefisien keamanan fasa pinggir (k₂)

Untuk konfigurasi *string* tipe V perhitungannya adalah :

$$k_2 = k_1 - 0,05$$

$$k_2 = 0,3 - 0,05 = 0,25$$

- e. Untuk konfigurasi saluran transmisi yang dipilih yaitu konfigurasi vertikal ganda, maka :

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

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

$$V_{FLPL} = (1 + 0,25) \times 1245,9 = 1557,4 \text{ kV}$$

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

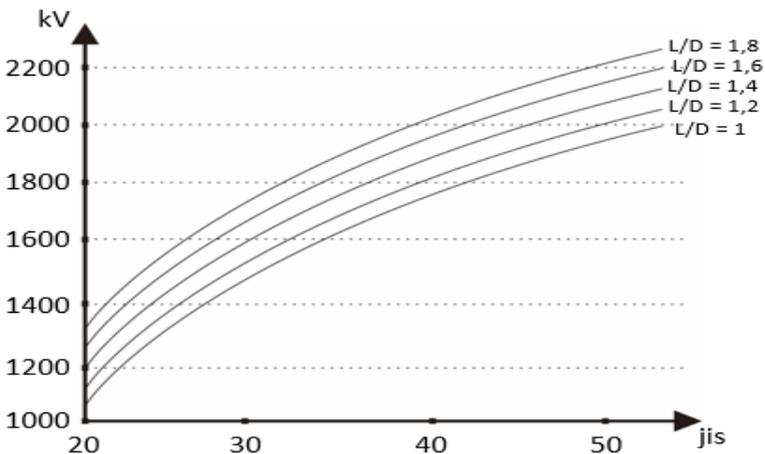
$$V_{KLPS} = (1 + k_2) V_w$$

$$V_{KLPS} = (1 + 0,25) \times 1076,25 = 1345,3 \text{ kV}$$

- f. Perhitungan jumlah isolator dan jarak sambaran

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

Untuk konfigurasi saluran vertikal, penentuan jumlah isolator yang digunakan mengacu pada grafik karakteristik *flashover* insulator. Nilai yang diambil disesuaikan dengan besarnya tegangan *flashover*. Bila nilai tegangan *flashover* yang diperoleh berupa pecahan, maka nilainya dibulatkan keatas. Berikut ini gambar 4.4 yang merupakan grafik karakteristik tegangan *flashover* terhadap insulator.



Gambar 4.4 Grafik Karakteristik Tegangan *Flashover* Kritis Terhadap Jumlah Isolator untuk Isolator Konfigurasi V *String*

Dari gambar grafik diatas, didapatkan jumlah isolator (jis) = 20 (untuk $L/D = 1,6$). Tetapi untuk faktor keamanan, perencanaan isolator menggunakan jumlah (jis) sebanyak 25 buah. Dan tipe isolator yang dipilih yaitu isolator tipe normal (*type A*) dengan spesifikasi pada tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Spesifikasi Isolator yang Dipilih

Kelas tegangan	500 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)	315 (min)
Diameter (mm)	280
Tinggi (mm)	146
<i>Electro mechanical failing load</i> (KN)	160
<i>Dry lightning impuls Withstand voltage</i> (kV)	110
<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 :

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

$$D = 146 \times 25 = 3650 \text{ mm} = 3,65 \text{ meter}$$

Pada isolator konfigurasi *V string* jumlah isolator (jis') adalah :

$$jis' = 2 \times jis = 2 \times 25 = 50 \text{ buah}$$

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 :

$$SFP = D \times H_s \times \delta$$

$$SFP = 3,65 \times 60\% \times 0,96 = 2,1 \text{ meter}$$

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

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

$$GFP = \frac{2,1 - 0,021}{1,115} = 1,87 \text{ meter}$$

4.15 Perencanaan Isolator Saluran transmisi

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan untuk merencanakan isolator transmisi 500 kV, maka dapat disusun hasil perencanaan isolator yang digunakan pada tabel 4.5 berikut ini.

Tabel 4.5 Hasil Perencanaan Isolator Saluran Transmisi 500 kV

Uraian	Tegangan sistem 500 kV
Konfigurasi saluran transmisi	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> (VCFO)	1245,9 kV
Tegangan <i>flashover switching</i> (Vw)	1076,25 kV
Tegangan <i>flashover</i> fasa pinggir akibat <i>lightning</i> (VFLPL)	1557,4 kV
Tegangan <i>flashover</i> fasa pinggir akibat <i>switching</i> (VFLPS)	1345,3 kV
Konfigurasi isolator	Isolator konfigurasi tipe V
Panjang rangkaian isolator (D)	3,65 meter
Jumlah isolator konfigurasi (jis)	50 buah
Jarak sambaran	2,1 meter
<i>Gap arcing horn</i>	1,87 meter

4.16 Pemilihan Menara

Penentuan menara yang digunakan sebagai tempat isolator dan konduktor didasarkan pada hasil perhitungan konfigurasi konduktor dan

pemilihan isolator. Untuk jarak antar menara mengacu pada standar yang ada untuk *span* standar yang digunakan rata-rata sebesar 400 m untuk SUTET 500 kV seperti yang tertera pada tabel 4.2.

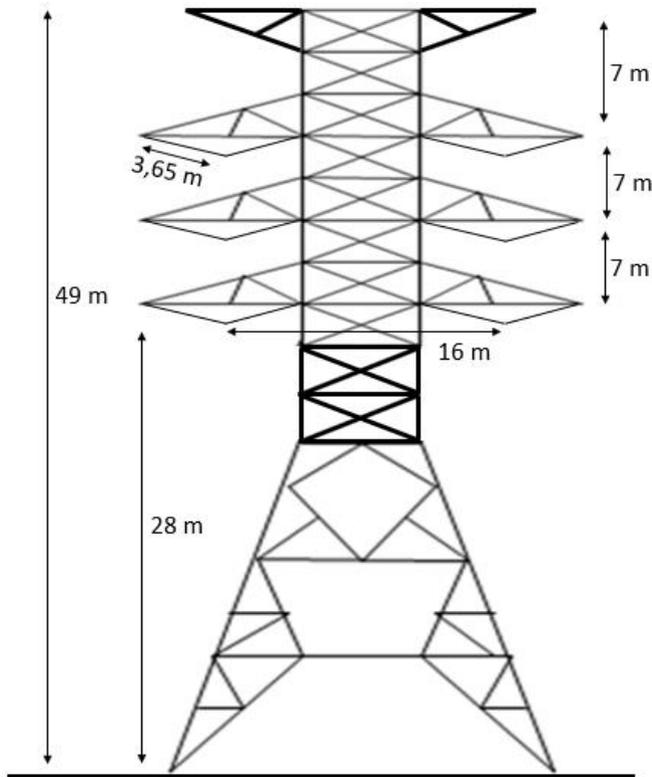
Mengacu pada hal diatas dapat dihitung berapa jumlah menara yang akan digunakan untuk saluran transmisi yang melintasi dari Tj. Redeb sampai Sabah dengan panjang jarak ± 300 km. Dengan data yang ada maka menara yang akan dibangun sebanyak :

$$\text{Jumlah menara} = 300000 / 400 = 750 \text{ menara}$$

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 $0^\circ - 2^\circ$ digunakan menara SUTET tipe AA
- Untuk sudut belokan $0^\circ - 5^\circ$ digunakan menara SUTET tipe AAR
- Untuk sudut belokan $0^\circ - 10^\circ$ digunakan menara SUTET tipe BB
- Untuk sudut belokan $10^\circ - 30^\circ$ digunakan menara SUTET tipe CC
- Untuk sudut belokan $30^\circ - 60^\circ$ digunakan menara SUTET tipe DD
- Untuk sudut belokan $60^\circ - 90^\circ$ digunakan menara SUTET tipe EE
- Untuk sudut belokan $0^\circ - 45^\circ$ digunakan menara SUTET tipe FF

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 $13 + 15 = 28$ meter. Berikut ini gambar 4.5 yang merupakan gambar konstruksi menara saluran transmisi berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan.



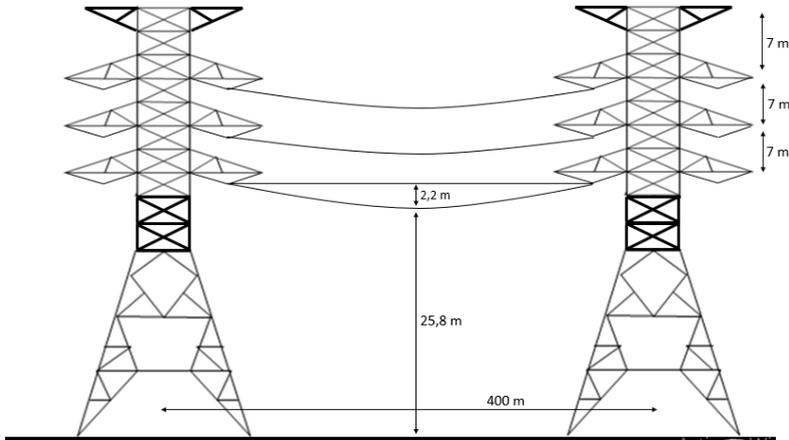
Gambar 4.5 Menara Transmisi 500 kV

Tinggi menara standar dapat berubah menyesuaikan daerah yang dilewati saluran transmisi. peraturan menteri perindustrian republik Indonesia nomor 15/M-IND/PER/3016 tentang “STANDAR SPESIFIKASI DAN STANDAR HARGA TOWER TRANSMISI DAN KONDUKTOR PRODUK DALAM NEGERI DALAM RANGKA PERCEPATAN PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR KETENAGALISTRIKAN” pada pasal 3 menyatakan bahwa menara transmisi tipe 500 kV, menggunakan menara 2x Zebra. Dengan berubahnya tinggi menara, maka berat menara juga akan berubah. Berikut ini tabel 4.6 yang menunjukkan perubahan tinggi menara dan perubahan berat menara.

Tabel 4.6 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

Konfigurasi kawat penghantar, harus menyesuaikan dengan menara. Sehingga konfigurasi konduktor setelah dilakukan perhitungan untuk andongan konduktor hasilnya dalam kondisi normal dan tinggi menara yang sama bisa dilihat pada gambar 4.6 sebagai berikut.



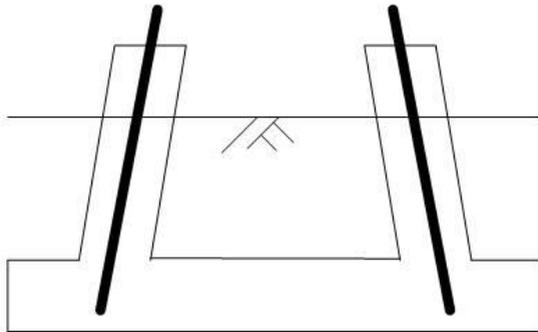
Gambar 4.6 Desain Saluran Transmisi Dalam Satu Gawang

4.17 Penentuan Pondasi Menara

Untuk menjamin keandalan dan keamanan dari suatu konstruksi karena adanya pengaruh dari berbagai faktor terhadap kekuatan bahan dan konstruksi, maka diperlukan toleransi faktor keamanan. Berdasarkan SPLN 121-1996 menyatakan bahwa untuk faktor keamanan pondasi menara adalah ≥ 2 . Ini berarti pondasi harus mampu menahan beban 2 kali berat menara.

Pada perencanaan pondasi menara, faktor yang paling mempengaruhi adalah kondisi tanah dan jenis menara apa yang akan dibangun antara *tension* atau *suspension*. Pada perencanaan ini menggunakan pondasi yang biasa digunakan untuk menara saluran transmisi yaitu pondasi *strap footing*. Pondasi *strap footing* merupakan salah satu jenis pondasi telapak. Bentuknya ini terbentuk pada dua kolom atau lebih bangunan dengan pondasi kaki tersendiri yang dihubungkan dengan balok penghubung (*strap-beam*). Sehingga kedua pondasi bekerja bersama-sama sebagai suatu pondasi gabungan, untuk itu balok

penghubung harus kuat memikul momen yang terjadi. Berikut ini gambar 4.7 merupakan konstruksi pondasi.



Gambar 4.7 Konstruksi Pondasi (Tapak Samping)

4.18 Pentanahan Kaki Menara

Untuk mencegah hubung singkat karena lompatan (*flashover*) sambara petir, perlu dilakukan usaha pengamanan selain tentang isolasinya. Pengaman tersebut yaitu memasang kawat tanah, menurunkan tahanan kaki menara atau memperlebar jarak kawat tanah dan kawat fasa. Berikut ini tabel jenis tanah dan nilai tahanan jenisnya bisa dilihat pada tabel 4.7 dibawah ini.

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

Nilai tahanan kaki pada menara perlu dibuat sekecil mungkin untuk menghindari efek sambaran petir. nilai tahanan ini ditentukan oleh bentuk fisik tahanan dan tahanan jenis dari tanah. Pada perencanaan kali ini dipilih tahanan berbentuk elektrode batang yang ditanam tegak lurus

di dalam tanah atau juga bisa menggunakan elektrode batang berselubung pipa galvanis. Biasanya digunakan rod elektrode sepanjang 5,5 m dan ditanam pada kedalaman yang sama yaitu 5,5 meter dengan jari-jari rod elektrode sebesar 1,27 cm.

Berdasarkan standar PT PLN (Persero), pentanahan kaki menara 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* yang dibuat dari kawat baja 38 mm² sebagai *counterpoise* yang ditanam secara radial.

Dengan adanya standar yang ada sehingga dapat menghitung pentanahan kaki menara sesuai dengan rumus persamaan yang telah tersedia. Rumus persamaan untuk pentanahan sistem ground rod adalah sebagai berikut :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times a^3 \times r}} \right)$$

Dimana :

- R = tahanan kaki menara (ohm)
- P = tahanan jenis tanah (ohm-meter)
- L = panjang batang pentanahan (meter)
- a = jarak antara batang pentanahan (meter)
- r = jari-jari batang pentanahan (meter)

Untuk tanah rawa atau sawah, maka :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times a^3 \times r}} \right)$$

$$R = \frac{30}{2\pi \times 5,5} \times \left(\ln \frac{2 \times 5,5}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times 16^3 \times 0,0127}} \right)$$

$$R = 1,15 \Omega$$

Untuk tanah ladang, maka :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times a^3 \times r}} \right)$$

$$R = \frac{100}{2\pi \times 5,5} \times \left(\ln \frac{2 \times 5,5}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times 16^3 \times 0,0127}} \right)$$

$$R = 3,8 \Omega$$

Untuk tanah pasir basah, maka :

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left(\ln \frac{2L}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times a^3 \times r}} \right)$$

$$R = \frac{200}{2\pi \times 5,5} \times \left(\ln \frac{2 \times 5,5}{\sqrt[4]{2^{1/2} \times 16^3 \times 0,0127}} \right)$$

$$R = 7,66 \Omega$$

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* : [14]

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

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 resistansi 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 :

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

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

$$L = 40,35 \text{ m}$$

Untuk kerikil basah, maka :

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

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

$$L = 98,15 \text{ m}$$

Untuk pasir atau kerikil kering, maka :

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

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

$$L = 208,22 \text{ m}$$

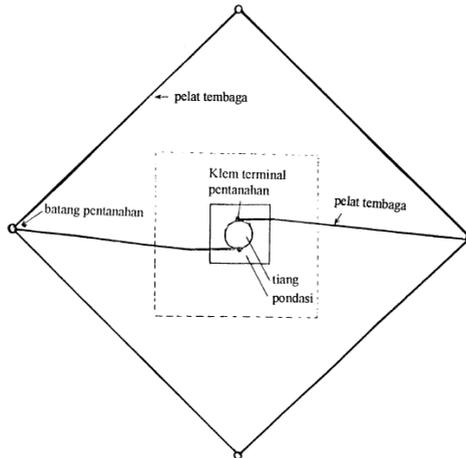
Untuk tanah berbatu, maka :

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

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

$$L = 625,1 \text{ m}$$

Berikut ini merupakan gambar pemasangan batang pentanahan kaki menara dilihat dari atas yang terdapat pada gambar 4.8 dibawah ini,



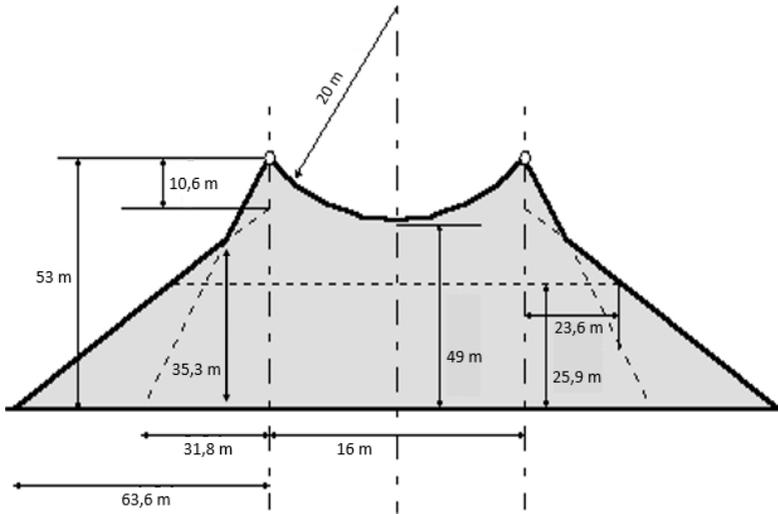
Gambar 4.8 Pemasangan Batang Pentanahan Kaki Menara (Tapak Atas)

4.19 Perancangan Kawat Tanah Sebagai Pelindung Sambaran Petir

Pada perencanaan kawat tanah pelindung sambaran petir menggunakan konduktor ACSR dengan luas penampang 50 mm². kawat pelindung petir diletakkan di puncak 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 :

$$\text{Andongan GSW} = 80\% \times 2,2 = 1,76 \text{ m}$$

Berikut ini gambar daerah perlindungan kawat tanah dengan menggunakan dua buah kawat tanah, bisa dilihat pada gambar 4.9 dibawah ini.



Gambar 4.9 Daerah Perlindungan Kawat Tanah Yang Direncanakan

4.20 Hitungan untuk Kegagalan Perisaian SUTET 500 kV

Untuk perhitungan ini digunakan menara SUTET yang terletak pada ketinggian permukaan tanah yang sama atau tidak ada perbedaan ketinggian menara, sehingga :

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

$$\text{Kawat fasa : } Y\phi = 32 - 2,2 = 29,8 \text{ m}$$

$$\text{Kawat tanah : } Yg = 53 - 1,76 = 51,2 \text{ m}$$

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

$$V_{50\%} = \left(K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}} \right) \times 10^3 \text{ kV}$$

$$V_{50\%} = \left((0,4 \times D) + \frac{(0,71 \times D)}{6^{0.75}} \right) \times 10^3$$

$$V_{50\%} = \left((0,4 \times 3,65) + \frac{(0,71 \times 3,65)}{6^{0.75}} \right) \times 10^3$$

$$V_{50\%} = 2135,9 \text{ kV}$$

- Hitungan radius amplop korona untuk kegagalan perisaian yaitu :

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

$$R \cdot \ln \left(\frac{2 \times 29,8}{R} \right) = \frac{3844,62}{1500}$$

$$R = 0,5462 \text{ meter}$$

- Hitungan radius ekivalen adalah :

$$r_{eki} = \sqrt[4]{r_1 d_{12} d_{13} d_{14}}$$

$$r_{eki} = \sqrt[4]{0,0105 \times 0,2 \times 0,2 \times 0,28} = 0,1 \text{ m}$$

- Radius korona dari konduktor berkas adalah :

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

$$R_c = 0,5462 + 0,1 = 0,65 \text{ m}$$

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

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

$$Z_{\phi} = 60 \sqrt{\ln \frac{2 \times 29,8}{0,1} \times \ln \frac{2 \times 29,8}{0,65}}$$

$$Z_{\phi} = 383,41 \Omega$$

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

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

$$I_{\min} = \left(\frac{2 \times 2135,9}{383,41} \right) = 11,1 \text{ kA}$$

- Jarak sambaran minimum adalah :

$$S = 8 \cdot I^{0,65} \text{ m}$$

$$S = 8 \times 11,1^{0,65} = 38,2 \text{ m}$$

- Daerah tak terlindungi
Terlebih dahulu diperiksa harga βS ,
Dimana untuk menara SUTET harga $\beta = 0,8$
Jadi, $\beta S = 0,8 \times 38,2 = 30,6$
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 :

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\beta S - Y \phi}{S} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{30,6 - 29,8}{38,2} \right) = 1,2$$

$$\omega = \cos^{-1} \left(\frac{F}{2S} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{9,8}{2 \times 38,2} \right) = 82,63$$

$$a_s = \tan^{-1} \left(\frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{16 - 16}{51,2 - 29,8} \right) = 0$$

Maka,

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

$$X_s = 38,2 (\cos (1,2) + \sin (0 - 82,63))$$

$$X_s = 0,3 \text{ m}$$

- 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 :

$$Y_0 = \frac{Y_G + Y_\phi}{2} = \frac{51,2 + 29,8}{2} = 40,5$$

$$m = \frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} = \frac{16 - 16}{51,2 - 29,8} = 0$$

$$A_s = m^2 - m^2 \beta - \beta^2 = 0^2 - (0^2 \times 0,8) - 0,8^2 = -0,64$$

$$B_s = \beta (m^2 + 1) = 0,8 (0^2 + 1) = 0,8$$

$$C_s = (m^2 + 1) = 0^2 + 1 = 1$$

Maka

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

$$S_{\max} = 40,5 \left| \frac{0,8 - \sqrt{0,8^2 + (-0,64 \times 1)}}{-0,64} \right|$$

$$S_{\max} = 50,63 \text{ m}$$

Dan nilai I_{\max} adalah :

$$I_{\max} = 0,041 \times S^{1,54} = 0,041 \times 50,63^{1,54} = 17,3 \text{ A}$$

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

$$P_{\min} = e^{-\frac{11,1}{34}} = 0,72$$

$$P_{\max} = e^{-\frac{17,3}{34}} = 0,6$$

- Gangguan kilat karena kegagalan perisaian adalah :

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

$$N_{SF} = 0,015 \times 150 \times \frac{0,3}{2} \times (0,72 - 0,6)$$

$$N_{SF} = 0,05 \text{ gangguan per 100 km-tahun}$$

4.21 Hitungan Impedansi Menara Transmisi

Menara yang digunakan adalah menara dengan jenis *lattice* yang modelnya pyramid. Maka nilai impedansi dari menara yang digunakan adalah :

$$\begin{aligned}
Z_t &= 30 \cdot \ln \left(\frac{2(h^2 + h \cdot r^2)}{r^2} \right) \\
&= 30 \cdot \ln \left(\frac{2(53^2 + (53 \times 16^2))}{16^2} \right) \\
&= 145,5 \, \Omega
\end{aligned}$$

4.22 Pedoman Teknis Pengurangan Dampak Medan Listrik dan Medan Magnet

Perhitungan medan magnet diantara dua kawat sejajar menggunakan persamaan berikut :

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi L} \frac{I}{L} = 2 \times 10^{-7} \times \frac{1801,34}{300000} = 0,012 \times 10^{-7} \text{ T} \approx 0 \text{ mT}$$

Sedangkan untuk nilai medan listriknya adalah :

$$E = \frac{V}{L} = \frac{500000}{300000} = 1,67 \text{ V/m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, medan magnet dan medan listrik yang dihasilkan oleh saluran transmisi nilainya masih jauh dibawah standar. Standar WHO dan SNI menyatakan bahwa maksimum medan listrik yang dihasilkan oleh saluran transmisi adalah 5 kV/m, dan medan magnet yaitu 0,1 mT.

Dari berbagai penelitian yang sudah dilakukan oleh para ahli, ditemukan kuat medan listrik di halaman atau diluar rumah lebih tinggi dibandingkan dengan didalam rumah. Sehingga dalam rangka menjaga kondisi lingkungan akibat adanya SUTET perlu diperhatikan hal-hal sebagai berikut :

- Usahakan atap rumah ada langit-langitnya (plavon).
- Tanam pohon sebanyak mungkin di sekitar rumah.
- Apabila ada bahan bangunan rumah yang menggunakan logam, harus diketahkan (di-ground).

- Disarankan untuk tidak keluar rumah atau nongkrong didepan (sekitaran) rumah saat malam hari. Karena saat itu arus yang mengalir pada konduktor lebih besar.
- Disarankan untuk tidak membuat jemuran diluar rumah.
- Apabila tetap membuat jemuran, kalua bisa tidak berbahan logam. Kalau berbahan logam wajib diketanahkan.
- Usahakan tidak memasang antena diluar dan diatas rumah.
- Usahakan tidak terdapat bahan-bahan yang bersifat konduktor berada di teras rumah yang bertingkat dibawah SUTET.
- Jangan melakukan kegiatan yang diluar nalar, seperti melihat apakah ada tegangan diatap rumah yang letaknya persis dibawah SUTET menggunakan tespen, meskipun tegangan induksi pada perlatan dibawah SUTET aman bagi manusia (penulis menyatkan bahwa induksi dari SUTET 500 kV sangatlah besar, dan penulis pernah mencoba mengecek genting rumah yang letaknya dibawah SUTET menggunakan tespen, yang hasilnya tespen tersebut menyala).

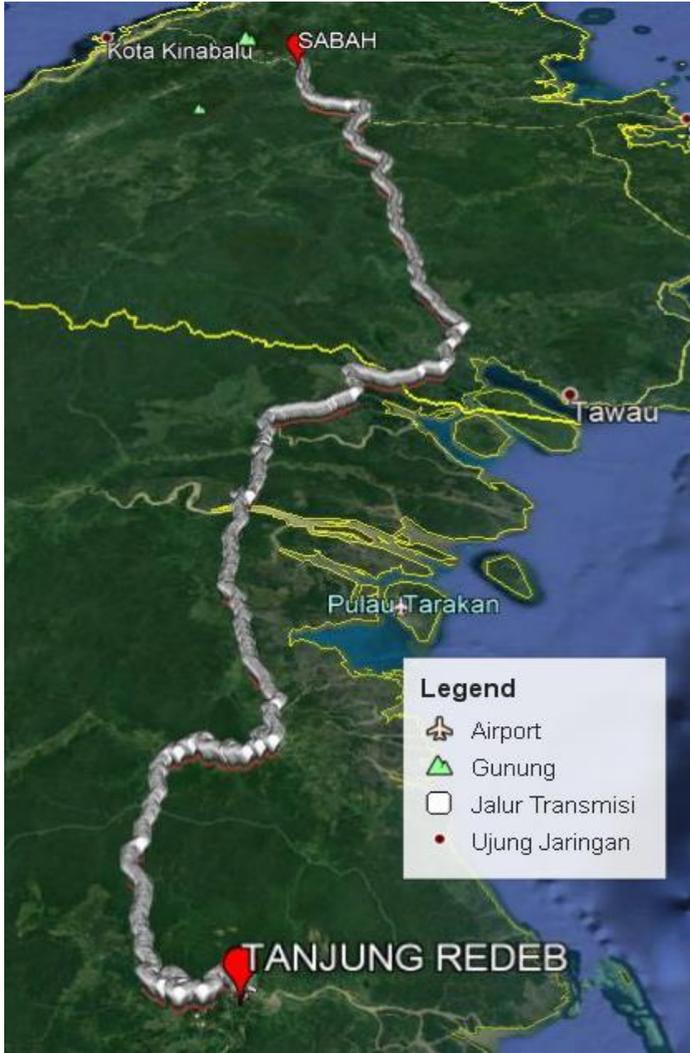
Masyarakat disarankan agar tidak melanggar peraturan atau masuk didalam daerah terlarang disekitar pentanahan kaki menara yang telah diberi petunjuk atau diberi pagar oleh PLN. Dalam melakukan pembangunan SUTET sangat perlu diperhatikan Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No.01.P/47/MPE/1992, mengenai jarak aman bagi penduduk yang lingkungannya dibawah SUTET.

4.23 Jalur Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah

Setelah mengetahui kondisi geografis dan kontur tanah di Provinsi Kalimantan Timur, Provinsi Kalimantan Utara, dan Sabah Malaysia. Sehingga bisa dilakukan pemilihan jalur saluran transmisi. Dalam melakukan pemilihan jalur transmisi direncanakan dengan cara, ketinggian permukaan tanah antara menara satu dengan lainnya dalam satu gawang tidak melebihi 1,5%. Yang artinya perbedaan tinggi antara menara dalam satu gawang maksimal 6 meter. Dan apabila di tengah-tengah bentangan konduktor terdapat gundukan tanah yang tingginya lebih dari 6 meter, maka kondisi seperti itu tidak bisa dilewati saluran transmisi 500 kV.

Pada perencanaan jalur saluran transmisi didapatkan panjang saluran transmisi dari Tj. Redeb sampai Sabah adalah ± 720 KM dengan jumlah menara ± 1800 buah. Untuk jumlah menara *suspension* sebanyak

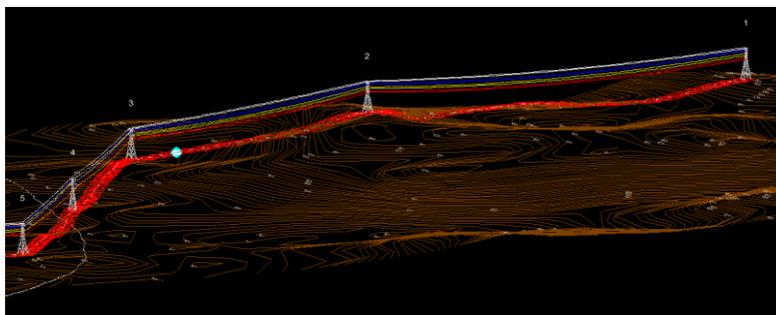
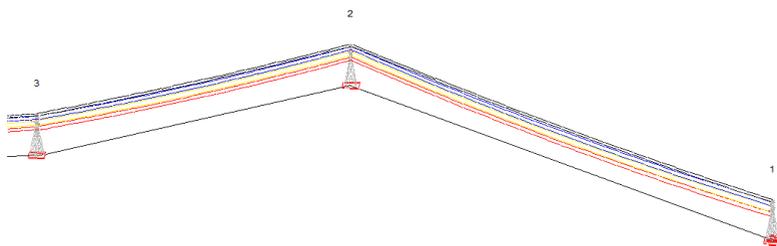
± 1620 buah dan jumlah menara *tension* sebanyak ± 180 buah. Berikut ini jalur saluran transmisi 500 kV Tj Redeb sampai Sabah bisa dilihat pada gambar 4.10 dibawah ini..



Gambar 4.10 Jalur Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah

4.24 Desain Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah

Setelah mengetahui jalur saluran transmisi, maka dilakukan desain saluran transmisi menggunakan *software* PLS CADD yang peletakan menara sesuai dengan titik jalur saluran transmisi yang sudah dibuat. Berikut ini desain saluran transmisi menggunakan *software* PLS CADD bisa dilihat pada gambar 4.11 dibawah ini.



Gambar 4.11 Desain Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

- a. Saluran transmisi ini menggunakan menara jenis *lattice* dengan tinggi 49 meter, srikot vertikal ganda dengan 4 *bundle conductor* dengan jarak 20 cm antar sub. Tipe konduktor ACSR yang luas penampangnya 240 mm², dengan perbandingan 26 Al dan 7 Stl. Isolator menggunakan tipe V *string* jumlahnya 2x25 buah. Dan jarak antar menara yaitu 400 – 500 meter.
- b. *Sagging* untuk dua menara dengan tinggi yang sama yaitu 2,2 – 3,7 meter. Sedangkan untuk menara dengan berbeda tinggi 1 meter adalah 1,73 – 3,2 meter.
- c. Pentanahan kaki menara menggunakan metode :
 - *Ground rod* dengan 4 buah *rod* elektrode yang panjangnya 5,5 m dan jari-jari 1,27 cm. pada tanah rawa atau sawah tahanan pentanahannya yaitu 0,36 ohm, pada tanah ladang adalah 1,19 ohm, pada tanah pasir basah adalah 2,37.
 - *Counterpoise* dengan kawat baja dengan luas penampang 38 mm². Untuk jenis tanah pasir basah membutuhkan panjang kawat 40,35 m, untuk tanah jenis kerikil basah membutuhkan panjang kawat 98,15 m, untuk tanah jenis kerikil kering membutuhkan panjang kawat 208,22 m, dan untuk tanah berbatu membutuhkan panjang kawat 625,1 m.
- d. Kawat pelindung petir (GSW) menggunakan dua buah kawat ACSR dengan luas penampang 50 mm², jari-jari kawat 0,4 cm
- e. Panjang saluran transmisi adalah 720 KM, dengan jumlah menara yang digunakan adalah 1800 buah, meliputi :
 - Menara *suspension* = 580 buah
 - Menara *tension* = 1220 buah
 - Tipe BB = 293 buah
 - Tipe CC = 371 buah
 - Tipe DD = 517 buah
 - Tipe EE = 39 buah

- f. Disekitar SUTET 500 kV terdapat medan magnet sebesar $0,012 \times 10^{-7}$ T dan medan listrik sebesar 1,67 V/m

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan diatas, maka :

- a. Pada perencanaan ini tidak dibahas berapa biaya yang dibutuhkan untuk realisasi pembangunan saluran transmisi dan pengaruh keberatan masyarakat sekitar terhadap pembangunan saluran transmisi. Sehingga diharapkan suatu saat ada yang meneliti mengenai jumlah anggaran yang dibutuhkan dan pengaruh keberatan masyarakat terhadap pembangunan saluran transmisi.
- b. Perencanaan saluran transmisi ini bisa menjadi acuan untuk realisasi pembangunan saluran transmisi dari Tj. Redeb sampai Sabah Malaysia.

DAFTAR PUSTAKA

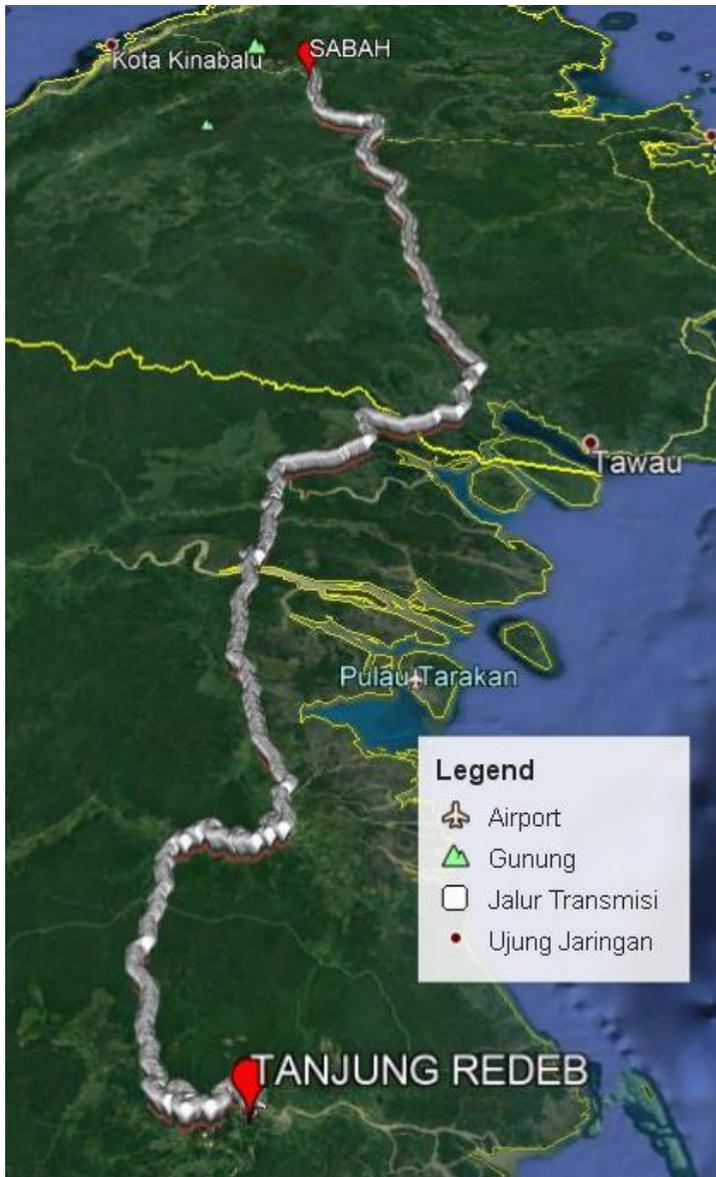
- [1] A. Arismunandar Dr., S. Kuwara Dr., “Buku Pegangan Teknik Tegangan Listrik Jilid II”, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, Cetakan Ketujuh, 2004
- [2] Andrew S. Timscheff, “Calculation of Gradien for Phase on Three Phase Bundle Conductor Line”, IEEE Trans. On Power System App, 1971
- [3] Begamurde R. D., “Extra High Voltage AC Transmission Engineering”, New Delhi, Willey, 1987
- [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] Syarifuddin M., Ir., M.Eng., “Perencanaan Jaringan Transmisi Tegangan Tinggi”, 1999
- [7] Turan Gonen, Third Edition “Electrical Power Transmission System Engineering” Analysis and Design, California State University, Sacramento, USA, 2014
- [8] T. S. Hutauruk, “Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja”, PT. Erlangga, Jakarta, 1991
- [9] T. S. Hutauruk, “Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan”, PT. Erlangga, Jakarta, 1991
- [10] T. S. Hutauruk, “Transmisi Daya Listrik”, PT. Erlangga, Jakarta, 1985
- [11] Udo T., “Minimum Phase to Phase Electrical Clearence Based On Switching Surge and Lightning Surge”, IEEE Trans. On Power System App, 1974
- [12] Zuhail, “Dasar Teknik Tegangan Listrik dan Elektronika Daya”, Pustaka Utama, Jakarta, 2000
- [13] Farisi Nurdin, “Studi Perencanaan Transmisi 500 kV Pada Anyer Tawar – Gurun Di Semenanjung Malaysia Dalam Kaitan Rencana Interkoneksi Dengan Sumatera”, Undergraduate Tugas Akhir, Surabaya : ITS, 2000
- [14] Nizar Nasrulloh, “Studi Perencanaan Saluran Transmisi 150 kV antara PLTU Jatim 1 – GI Pacitan”, Undergraduate Tugas Akhir, Surabaya : ITS, 2007

- [15] Widen Lukmantono, “Studi Perencanaan Saluran Transmisi 150 kV Bambe Incomer”, Undergraduate Tugas Akhir, Surabaya : ITS, 2012
- [16] Buku Pedoman Pemeliharaan, “Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Ekstra Tinggi (SUTT/SUTET)”, Jakarta, 2014
- [17] Badan Standarisasi Nasional, “Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000)”, Jakarta, 2000
- [18] RUPTL, “Rencana Usaha Penyedia Tegangan Listrik PT. PLN (Persero) 2019-2028”, Jakarta, 2019
- [19] SPLN 121, “Konstruksi Saluran Udara Tegangan Tinggi 70 kV dan 150 kV dengan Tiang Beton/Baja”, Jakarta, 1996
- [20] SPLN 41-7, “Spesifikasi Konduktor ACSR”, Jakarta, 1981
- [21] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, “Ruang Bebas dan Jarak Bebas Minimum 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
- [22] Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia, “Standar Spesifikasi dan Standar Harga Tower Transmisi dan Konduktor Produk Dalam Negeri Dalam Rangka Percepatan Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan”, Jakarta, 2016
- [23] Badan Pusat Statistik (BPS), “Sensus Penduduk”, <URL : <https://sp2010.bps.go.id/index.php/site/index> >, 2010
- [24] Badan Pusat Statistik Kalimantan Timur (BPS), “Rata-rata Suhu Udara, Kelembaban, Tekanan Udara, Kecepatan Angin, Curah Hujan, dan Penyinaran Matahari Melalui Stasiun Meteorologi Samarinda”, < URL : <https://kaltim.bps.go.id/statictable/2015/03/12/217/rata-rata-suhu-udara-kelembaban-tekanan-udara-kecepatan-angin-curah-hujan-dan-penyinaran-matahari-melalui-stasiun-meteorologi-samarinda-2015-.html> > Samarinda, 2015
- [25] Wikipedia, “Kalimantan Timur”, < URL : [https://id.wikipedia.org/wiki/Kalimantan_Timur#Geografi_dan_I_klim\[22\]](https://id.wikipedia.org/wiki/Kalimantan_Timur#Geografi_dan_I_klim[22]) >, 2018

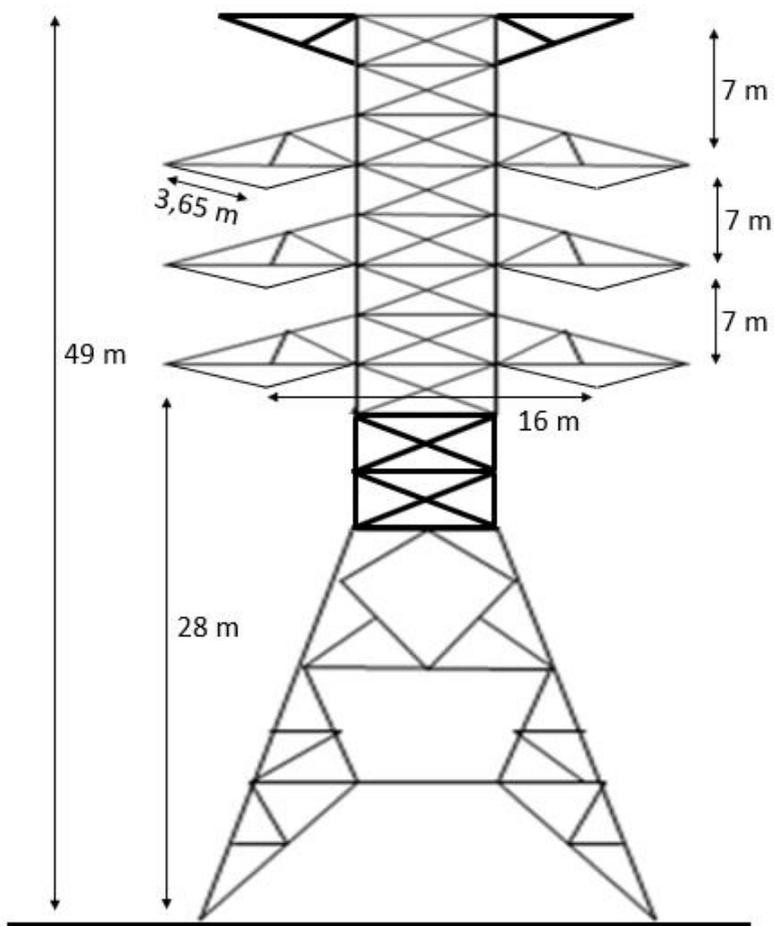
LAMPIRAN



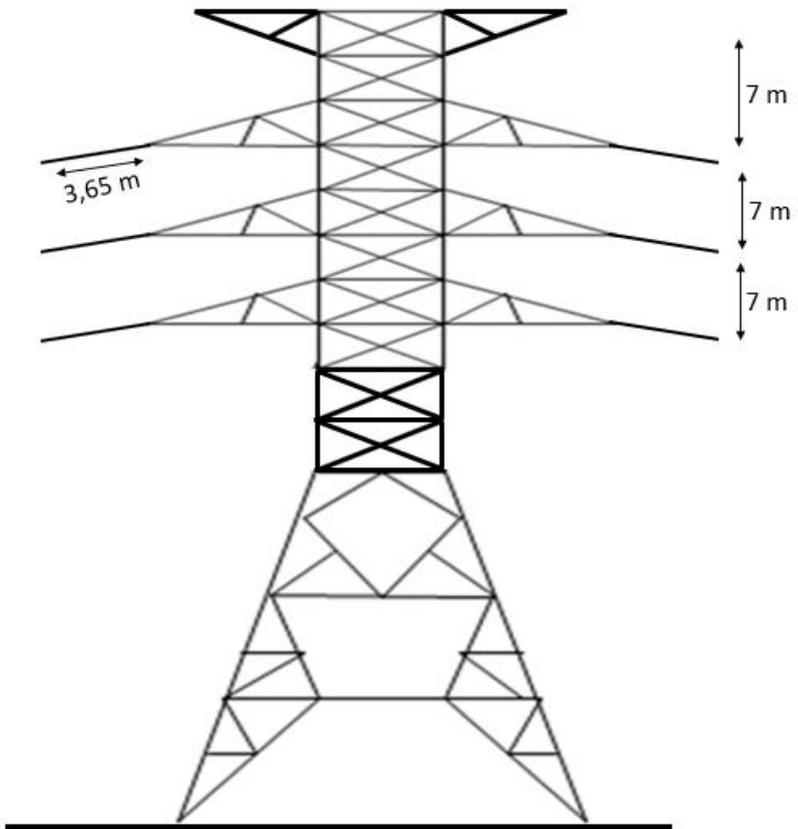
Peta Tj. Redeb – Sabah



Jalur SUTET 500 kV Tj. Redeb – Sabah



Menara Suspension Saluran Transmisi 500 kV



Menara Tension Saluran Transmisi 500 kV



Menara Tension Saluran Transmisi 500 kV

Tabel Spesifikasi Konduktor 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
16/2.5	6 / 1.80	1 / 1.80	15.3	2.5	5.40	62	6.0	1.879	109	2,000
25/4	6 / 2.25	1 / 2.25	23.9	4.0	6.75	96	9.2	1.203	144	2,000
35/6	6 / 2.70	1 / 2.70	34.4	5.7	8.10	139	12.7	0.8353	182	2,000
44/32	14 / 2.00	7 / 2.40	44.0	31.7	11.20	248	43.0	0.6533	225	2,000
50/8	6 / 3.20	1 / 3.20	48.3	8.0	9.60	195	17.1	0.5946	226	2,000
50/30	12 / 2.33	7 / 2.33	51.2	29.8	11.65	375	43.8	0.5644	245	2,000
70/12	26 / 1.85	7 / 1.44	69.9	11.4	11.72	282	26.8	0.4130	287	2,000
95/15	26 / 2.15	7 / 1.67	94.4	15.3	13.61	380	35.8	0.3053	348	2,000
95/55	12 / 3.20	7 / 3.20	96.5	56.3	16.00	707	79.4	0.2992	368	2,000
105/75	14 / 3.10	19 / 2.25	105.7	75.5	17.45	594	108.5	0.2719	395	2,000
120/20	26 / 2.44	7 / 1.90	121.6	19.8	15.46	491	45.7	0.2374	409	2,000
120/70	12 / 3.60	7 / 3.60	122.1	71.3	18.00	895	100.0	0.2364	428	2,000
125/30	30 / 2.33	7 / 2.33	127.9	29.8	16.31	587	57.6	0.2259	425	2,000
150/25	26 / 2.70	7 / 2.10	148.9	24.2	17.10	601	55.3	0.1939	465	2,000
170/40	30 / 2.70	7 / 2.70	171.8	40.1	18.90	788	76.8	0.1682	514	2,000
185/30	26 / 3.00	7 / 2.33	183.8	29.8	18.99	741	66.2	0.1571	533	2,000
210/35	26 / 3.20	7 / 2.49	209.1	34.1	20.27	844	74.9	0.1380	579	2,000
210/50	30 / 3.00	7 / 3.00	212.1	49.5	21.00	973	93.9	0.1363	588	2,000
230/30	24 / 3.50	7 / 2.33	230.9	29.8	20.99	870	73.1	0.1249	614	2,000
240/40	26 / 3.45	7 / 2.68	243.1	39.5	21.84	980	86.4	0.1183	638	2,000
265/35	24 / 3.74	7 / 2.49	263.7	34.1	22.43	994	83.1	0.1094	669	2,000
300/50	26 / 3.88	7 / 3.00	307.4	49.5	24.52	1,236	107.0	0.09390	736	2,000
305/40	54 / 2.68	7 / 2.68	304.6	39.5	24.12	1,151	99.4	0.09490	733	2,000
340/30	48 / 3.00	7 / 2.33	339.3	29.8	24.99	1,169	92.9	0.08539	780	2,000

Sumber : SPLN 41-7 : 1981

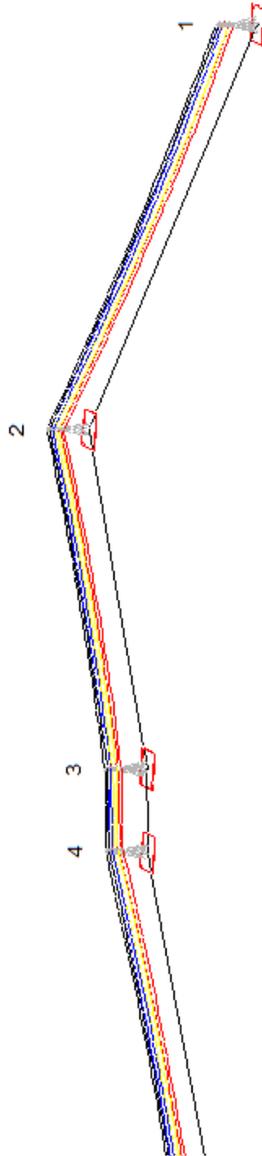
Tabel Spesifikasi Konduktor ACSR

Type	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						
	No. / mm	No. / mm	mm ²	mm ²	mm	kg/km	kN	Ohm/km	A	m
Condor	54 / 3.08	7 / 3.08	402.3	52.2	27.72	1,522	124.3	0.07173	876	2,000
Tern	45 / 3.38	7 / 2.25	403.8	27.8	27.03	1,335	97.5	0.07168	869	2,000
Drake	26 / 4.44	7 / 3.45	402.6	65.4	28.11	1,627	139.7	0.07167	880	2,000
Cuckoo	24 / 4.62	7 / 3.08	402.3	52.2	27.72	1,522	123.8	0.07166	876	2,000
Coot	36 / 3.77	1 / 3.77	401.9	11.2	26.39	1,194	72.9	0.07134	865	2,000
Redwing	30 / 3.92	19 / 2.35	362.1	82.4	27.43	1,651	153.7	0.07987	828	2,000
Starling	26 / 4.21	7 / 3.28	361.9	59.1	26.68	1,465	125.9	0.07963	823	2,000
Stilt	24 / 4.39	7 / 2.92	363.3	46.9	26.32	1,372	113.3	0.07961	820	2,000
Gannet	26 / 4.07	7 / 3.16	338.3	54.9	25.8	1,366	117.3	0.08551	786	2,000
Flamingo	24 / 4.23	7 / 2.82	337.3	43.7	25.4	1,276	105.5	0.08546	783	2,000
Egret	30 / 3.70	19 / 2.22	322.6	73.5	25.9	1,472	140.6	0.08984	769	2,000
Scoter	30 / 3.70	7 / 3.70	322.6	75.3	25.9	1,484	135.5	0.08984	769	2,000
Grosbeak	26 / 3.97	7 / 3.09	321.8	52.5	25.2	1,302	111.9	0.08957	763	2,000
Rook	24 / 4.14	7 / 2.76	323.1	41.9	24.8	1,222	101.0	0.08960	760	2,000
Swift	36 / 3.38	1 / 3.38	323.0	9.0	23.7	960	60.7	0.08916	751	2,000
Kingbird	18 / 4.78	1 / 4.78	323.0	17.9	23.9	1,030	69.7	0.08914	754	2,000
Teal	30 / 3.61	19 / 2.16	307.1	69.6	25.2	1,398	133.4	0.09443	744	2,000
Wood Duck	30 / 3.61	7 / 3.61	307.1	71.6	25.3	1,413	129.0	0.09443	745	2,000
Squab	26 / 3.87	7 / 3.01	305.8	49.8	24.5	1,236	108.1	0.09422	739	2,000
Peacock	24 / 4.03	7 / 2.69	306.1	39.8	24.2	1,159	95.9	0.09413	736	2,000
Eagle	30 / 3.46	7 / 3.46	282.1	65.8	24.2	1,298	122.9	0.1027	706	2,000
Dove	26 / 3.72	7 / 2.89	282.6	45.9	23.6	1,142	101.1	0.1024	701	2,000
Parakeet	24 / 3.87	7 / 2.58	282.3	36.6	23.2	1,068	88.3	0.1024	698	2,000
Ospray	18 / 4.47	1 / 4.47	282.5	15.7	22.4	900	61.0	0.1019	692	2,000
Hen	30 / 3.20	7 / 3.20	241.3	56.3	22.4	1,110	105.2	0.1197	639	2,000
Hawk	26 / 3.44	7 / 2.68	241.6	39.5	21.8	978	86.7	0.1196	635	2,000
Flicker	24 / 3.58	7 / 2.39	241.6	31.4	21.5	915	76.8	0.1195	632	2,000
Pelican	18 / 4.14	1 / 4.14	242.3	13.5	20.7	772	52.3	0.1189	627	2,000
Lark	30 / 2.92	7 / 2.92	200.9	46.9	20.4	924	90.3	0.1437	569	2,000
Ibis	26 / 3.14	7 / 2.44	201.3	32.7	19.9	814	72.1	0.1435	565	2,000
Brant	24 / 3.27	7 / 2.18	201.6	26.1	19.6	762	64.7	0.1434	563	2,000
Chickadee	18 / 3.77	1 / 3.77	200.9	11.2	18.9	640	43.4	0.1427	557	2,000
Oriole	30 / 2.69	7 / 2.69	170.5	39.8	18.8	785	77.4	0.1698	511	2,000
Linnet	26 / 2.89	7 / 2.25	170.6	27.8	18.3	690	62.8	0.1696	507	2,000

Sumber : ASTM 232 : 2001

Data Konduktor yang Digunakan

Nama konduktor			Hawk
Area	Aluminium	AWG or MCM	477.000
		mm ²	241.68
	Steel	mm ²	39.42
	Total	mm ²	281.10
Stranding and diameter	Aluminium	mm	26/3.44
	Steel	mm	7/2.67
Approximate overall diameter		mm	21.79
Linear mass	Aluminium	kg/km	670.0
	Steel	kg/km	308.0
	Total	kg/km	978.0
Rate tensile strength		daN	8665
Maximum D.C. Resistance at 20° C			0.11990
Current rating		A	455



Desain Saluran Transmisi 500 kV Tj. Redeb – Sabah

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Naufal Hilmi Utomo, adalah anak pertama dari dua bersaudara yang dilahirkan pada 20 Maret 1996 di Surabaya, Jawa Timur. Penulis bermukim di Desa Magersari RT04 RW01 No.105 Krian, Sidoarjo, Jawa Timur. Penulis telah menempuh pendidikan masa sekolah di TK Aisyiyah Bustanul Athfal Krian, SDN Krian 4, SMPN 1 Krian, dan SMAN 1 Wonoayu. Lalu, penulis melanjutkan studi perkuliahan di Departemen Teknik Elektro Otomasi (D3) Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2014. Semasa di departemen tersebut, penulis aktif dalam kepanitiaan di tingkat departemen dan fakultas, seminar, dan pelatihan yang diadakan oleh Laboratorium Elektronika Dasar, Automation Computer Laboratory, dan Laboratorium Elektronika Terapan. Serta menjadi Asisten Laboratorium Elektronika Dasar. Penulis lulus setelah 3 tahun menempuh masa pendidikan. Karena keinginan untuk melanjutkan studi ke pendidikan sarjana (S1), penulis menempuh pendidikan Lintas Jalur (LJ) di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro ITS bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui *email* : naufalhilmi435@gmail.com.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---