

SKRIPSI

**PERANCANGAN INTERKONEKSI JTM 20KV KABEL
BAWAH LAUT DARI CENTRAL POINT INDONESIA- PULAU
LAE-LAE**

Disusun dan diajukan oleh:

VIGO ASWARI IR KARAYA

D041 18 1314



**PROGRAM STUDI SARJA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

SKRIPSI

**PERANCANGAN INTERKONEKSI JTM 20KV KABEL
BAWAH LAUT DARI CENTRAL POINT INDONESIA- PULAU
LAE-LAE**

Disusun dan diajukan oleh:

VIGO ASWARI IR KARAYA

D041 18 1314



**PROGRAM STUDI SARJA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PERANCANGAN INTERKONEKSI JTM 20 KV KABEL BAWAH LAUT DARI
CENTRAL POINT INDONESIA – PULAU LAE-LAE**

Disusun dan diajukan oleh:

VIGO ASWARI I.R. KARAYA

D041 18 1314

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 01 Februari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T.
NIP. 19621231 199003 1 024



Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.
NIP. 19760914 200801 1 006

Ketua Departemen Teknik Elektro,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Vigo Aswari I.R. Karaya

NIM : D041181314

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

PERANCANGAN INTERKONEKSI JTM 20 KV KABEL BAWAH LAUT CENTRAL POINT INDONESIA – PULAU LAE-LAE

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 1 Februari 2023

Yang Menyatakan



Vigo Aswari I.R. Karaya

KATA PENGANTAR

Puji Syukur Kepada Tuhan atas berkat karunia, hikmat serta penyertaannya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul “PERANCANGAN INTERKONEKSI JTM 20KV KABEL BAWAH LAUT DARI CENTRAL POINT INDONESIA - PULAU LAE-LAE”. Adapun tujuan penulis membuat skripsi ini sebagai persyaratan tugas akhir untuk menyelesaikan studi Program Sarjan di Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.

Penulis Menyadari bahwa selama proses penyelesaian tugas akhir ini, banyak pihak yang memberikan bimbingan, nasehat, dan berupa dukungan, untuk itu penulis ingin mengucapkan kepada Tuhan yang Maha Esa, terkhusus juga kepada orang tua tercinta **Irwan S.E.,M.M.** dan **Rahel** yang selalu memberikan motivasi, kasih sayang, doa, nasehat dan kesabaran. Penulis berharap dapat menjadi anak yang dibanggakan kedua orang tua dan banyak orang. Penulis juga mengucapkan banyak terimakasih untuk saudara terkasih **Fatrio Juswan Karaya** dan **Tribastian Karaya** yang senantiasa mendukung dan mendoakan. Tidak lupa Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada:

- 1) Bapak **Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T.** selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak **Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.** selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan dalam pengerjaan skripsi ini.
- 2) selaku Dosen Penguji I dan Ibu **Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T.** selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan dan saran kepada penulis
- 3) Bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.**, selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
- 4) Bapak **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 5) Ibu **Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.**, selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 6) Seluruh dosen dan staf pegawai Departemen Teknik Elektro yang telah banyak membantu dan memberi kemudahan selama menempuh proses perkuliahan.

- 7) **Patricia Banne** yang selalu setia menemani dalam suka dan duka, serta dukungan, motivasi, dan doa dalam mengerjakan skripsi ini. Berterimakasih juga untuk selalu setia membantu dalam segala hal.
- 8) Rekan-rekan Level Up yang menjadi keluarga saya di fakultas Teknik serta juga KMKO Teknik dan KMKO Elektro Teknik yang menjadi ladang dalam pelayanan.
- 9) Rekan-Rekan Bajipamai (**Ihsan, Askar, Irul, Iqbal** dan **Brama**) yang setia menemani, mendukung dan menjadi teman seperjuangan di Ranggong.
- 10) Kanda-Kanda dan Adinda yang berada di KOSTEL yang menjadi tempat permabaran dan berbagi cerita. Penulis mengucapkan selamat berjuang dan jangan lelah.
- 11) Semua teman-teman seperjuangan CAL18RATOR. Kuatkan diri kalian dan jangan pernah ragu. Karena tidak ada satu pun orang yang hentikan langkah kalian untuk MERAH MIMPI.
- 12) Kepada teman-teman Lab Riset Grup Infrastruktur Ketenagalistrikan dan T3 yang selalu menemani di lab saat proses penyusunan tugas akhir ini.
- 13) Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu demi satu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan pada skripsi ini. Oleh karena itu, saran dan kritik dari semua pihak dapat menjadi masukan untuk menyempurnakan skripsi ini.

Gowa, 1 Februari 2023

Vigo Aswari I.R. Karaya

ABSTRAK

Vigo Aswari I.R. Karaya, *Perancangan Interkoneksi JTM 20kV Kabel Bawah Laut Dari Central Point Indonesia- Pulau Lae-Lae* (dibimbing oleh Salama dan Ikhlas Kitta)

Keberadaan sistem interkoneksi membuat hubungan kelistrikan dapat tersedia secara kontinuitas diberbagai wilayah. Jaringan interkoneksi di Indonesia diupayakan oleh pemerintah agar dapat terealisasikan pada Tahun 2024 dengan cara melakukan interkoneksi pada pulau-pulau besar di Indonesia. Perancangan sistem interkoneksi kabel bawah laut pada Pulau Lae-Lae dilakukan dengan menentukan jalur penggelaran kabel dan menentukan sistem kelistrikan pulau lae-lae dan total kebutuhan daya pada tahun 2032. Peramalan dilakukan dengan metode eksponensial dalam menentukan pertumbuhan pelanggan. Beban puncak yang terjadi pada pulau Lae-Lae adalah 159 kW, setelah pembentukan pola 24 jam beban Lae-Lae meningkat hingga 477,56 kW. Peramalan dilakukan dengan menghitung kebutuhan daya pada pulau Lae-Lae. Pada Tahun 2022 kebutuhan daya adalah sebesar 360900 VA dengan pelanggan sebanyak 401. Pada Tahun 2032 meningkat menjadi 510438 VA dengan total pelanggan 567. Sesuai dengan kebutuhan daya maka trafo yang digunakan sebesar 800 kVA/20 kV. Penentuan kabel berdasarkan beban maksimal pada Pulau Lae-Lae sehingga kabel yang akan digunakan adalah dengan luas penampang 35 mm² berisolasi XLPE dengan pembentangan kabel dimulai dari CPI ke pulau lae-lae dengan jarak 620 m. Tegangan kerja 20 kV, drop tegangan pada saluran yaitu 14 V, daya sisi kirim sebesar 640 kW dan daya sisi terima adalah 639 kW dengan KHA pada kabel sebesar 142,926 A.

Kata kunci: Interkoneksi, Kabel bawah Laut, Pulau Lae-Lae, Peramalan.

ABSTRACT

Vigo Aswari I.R. Karaya, *Design of JTM Interconnection 20kV Undersea Cable From Indonesia's Central Point - Lae-Lae Island* (supervised by Salama Manjang dan Ikhlas Kitta)

The existence of an interconnection system makes electrical relations available continuously in various regions. The interconnection network in Indonesia is sought by the government so that it can be realized in 2024 by interconnecting to large islands in Indonesia. The design of the submarine cable interconnection system on Lae-Lae Island is carried out by determining the cable deployment line and determining the lae-lae island electrical system and the total power needs in 2032. Forecasting is carried out by exponential methods in determining customer growth. The peak load occurring on the island of Lae-Lae was 159 kW, after the formation of a 24-hour pattern the Lae-Lae load increased to 477.56 kW. Forecasting is done by calculating the power requirements on the island of Lae-Lae. In 2022 the power requirement is 360900 VA with 401 customers. By 2032 it will increase to 510438 VA with a total of 567 customers. In accordance with the power requirements, the transformer used is 800 kVA / 20 kV. The determination of the cable is based on the maximum load on Lae-Lae Island so that the cable to be used is with a cross-sectional area of 35 mm² insulated XLPE with cable opposition starting from CPI to lae-lae island with a distance of 620 m. Working voltage is 20 kV, voltage drop on the line is 14 V, send side power is 640 kW and receive side power is 639 kW with KHA on the cable of 142,926 A.

Keywords: Interconnection, Undersea Cables, Lae-Lae Island, Forecasting.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB 1	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Tujuan Penilitan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat penelitian	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	2
BAB II	4
2.1 Deskripsi Umum JTM	4
2.1.1 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)	5
2.1.2 Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SUKTM)	5
2.1.3 Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah	5
2.2 Teori Umum Kabel Bawah Laut	6
2.3 Jenis Jenis Kabel Laut	7
2.3.1 Kabel Laut dengan Isolasi Kertas Diimpregnasi.....	8
2.3.2 Kabel Laut Berisolasi Minyak	8
2.3.3 Kabel Laut Berisi Gas	8
2.3.4 Kabel Laut dengan Isolasi Extrude Dielektrik	9
2.4 Konstruksi Kabel Laut.....	9
2.4.1 Penghantar.....	10
2.4.2 Islolasi	11
2.4.3 Pelindung Kabel.....	11

2.4.4	Pemasangan Kabel Laut.....	12
2.4.5	Sebab-Sebab Kerusakan Pada Kabel Laut.....	13
2.5	Karakteristik Elektris Kabel Laut.....	14
2.5.1	Resistansi DC.....	14
2.5.2	Resistansi AC.....	15
2.5.3	Induktansi.....	16
2.5.4	Kapasitansi.....	16
2.5.5	Temperatur Kabel Laut.....	17
2.5.6	Kemampuan Hantar arus.....	17
2.6	Jaringan Distribusi.....	19
2.7	Rugi-Rugi Jaringan Distribusi.....	21
2.8	Pembebanan Transformator.....	23
2.9	Batimetri.....	23
2.10	Peramalan Kebutuhan Listrik.....	24
2.10.1	Pertumbuhan Eksponensial.....	24
2.10.2	Pertumbuhan PDRB.....	25
2.10.3	Elastisitas.....	26
2.10.4	Pertumbuhan Pelanggan.....	26
BAB III.....		28
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	28
3.2	Peralatan Yang Digunakan.....	28
3.3	Prosedur Penelitian.....	29
3.4	Diagram Alir.....	33
BAB IV.....		34
4.1	Profil Pulau Lae-Lae.....	34
4.2	Oceanografi.....	36
4.2.1	Pasang Surut.....	36
4.2.2	Pola Arus Laut.....	37
4.2.3	Batimetri.....	40
4.3	Pelayaran Makassar - Lae-Lae.....	41
4.4	Beban Pulau Lae-Lae.....	42
4.4.1	Profile Beban Pulau Lae-Lae.....	42
4.4.2	Proyeksi Beban.....	44
4.4.3	Pertumbuhan Penduduk.....	48

4.4.4	Pertumbuhan Kebutuhan Daya Pulau Lae-Lae	49
4.5	Pemodelan Distribusi Listrik.....	54
4.6	Penentuan Trafo.....	54
4.7	Penentuan Jenis Kabel.....	55
4.8	Rugi – Rugi Daya Kabel.....	60
4.9	Jalur dan Panjang Kabel	63
4.10	JTM Pulau Lae-Lae	63
BAB V		65
5.1	Kesimpulan.....	65
5.2	Saran	65
DAFTAR PUSTAKA		66
LAMPIRAN.....		68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Konstruksi Kabel Laut.....	10
Gambar 2 Sistem Jaringan Radial	19
Gambar 3 Sistem Jaringan Tertutup	20
Gambar 4 Sistem Jaringan Network/ Mesh	20
Gambar 5 Sistem Jaringan Interkoneksi.....	21
Gambar 6 Peta Lokasi penelitian (Google Earth).....	28
Gambar 7 Diagram Alir Penelitian.....	33
Gambar 8 Pulau Lae-Lae dan Daratan Makassar (Google Maps).....	34
Gambar 9 Data fasilitas Umum Pulau Lae-Lae (BPS Kota Makassar,2021).....	36
Gambar 10 Grafik Pasang Surut Selat Makassar Mei 2022.	37
Gambar 11 Pola Arus Pasang Selat Makassar.....	39
Gambar 12 Pola Arus Surut Selat Makassar	39
Gambar 13 Peta Batimetri Pulau Lae-lae dan Central Point Indonesia.....	40
Gambar 14 Mesin PLTD Pulau Lae-Lae.....	43
Gambar 15 Profil pembebanan PLTD Pulau Lae-Lae.....	44
Gambar 16 Pola Beban 24 jam Pulau Lae-Lae.....	47
Gambar 17 Grafik Perumbuhan Daya Pulau Lae-Lae 2019-2032	54
Gambar 18 Rancangan Single Line Diagram	54
Gambar 19 Struktur Kabel N2XSEBY.....	57
Gambar 20 Jalur Kabel CPI – Pulau Lae-Lae.	63
Gambar 21 Titik Tiang Distribusi Pulau Lae-Lae.....	64

DAFTAR TABEL

Table 1 Tahanan Jenis dan Berat Logam.	10
Table 2 Temperature maksimum konduktor pada kabel	17
Table 3 Peralatan Penelitian	28
Table 4 Data Kependudukan Pulau Lae-Lae (BPS Kota Makassar 2021)	35
Table 5 Komponen Pasang Surut	36
Table 6 Kecepatan Arus Daerah Lae – Lae Mei 2022.	37
Table 7 Realiasi keberangkatan dan kedatangan.....	
Kapal (Dermaga-Pulau Lae-Lae)	42
Table 8 Profil pembebanan PLTD Pulau Lae-Lae	43
Table 9 Perkiraan beban harian Pulau Lae-Lae.....	45
Table 10 Hasil Tabulasi Beban Harian Per Jam Pulau Lae-Lae.	46
Table 11 Proyeksi Penduduk 10 Tahun Kedepan.....	48
Table 12 Pertumbuhan PDRB	49
Table 13 Pertumbuhan PDRB Kota Makassar	50
Table 14 PDRB total dengan pelanggan 2019-2022	51
Table 15 Pertumbuhan pelanggan rumah tangga	
Pulau lae-Lae Tahun 2022-2023	52
Table 16 Daya tersambung Pulau Lae-Lae tahun 2019-2032	53
Table 17 Parameter Listrik Kabel XLPE 35mm ²	56
Table 18 Karakteristik Kabel.....	58
Table 19 Resistivitas Termal Kabel N2XSEYBY	59
Table 20 Parameter Kabel Isolasi XLPE.....	62
Table 21 Koordinat Titik Desain Jalur Kabel Laut Antara Pulau Lae-Lae- CPI. .	63

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kuesioner Penelitian.....	68
Lampiran 2 Dokumentasi.....	69
Lampiran 3 Data dan Perhitungan pasang Surut Selat makassar.....	70
Lampiran 4 Hasil Perhitungan Pasang Surut	74
Lampiran 5 Kondisi Pembangkit Listrik Pulau Lae-Lae	80
Lampiran 6 Pengelompokan dan Penentuan Beban Pulau Lae-Lae	81
Lampiran 7 Single line diagram Makassar Selatan.....	82
Lampiran 8 Katalog Transformator Trafoindo	83
Lampiran 9 Data Kabel N2XSEYBY	84

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem interkoneksi merupakan sistem kelistrikan yang menghubungkan jaringan listrik saluran transmisi dari beberapa pembangkit listrik dan gardu induk dengan melayani beban yang terhubung pada saluran distribusi. Keberadaan sistem interkoneksi membuat hubungan kelistrikan dapat tersedia secara kontinuitas diberbagai wilayah. Pada Tahun 2024 yang akan datang pemerintah di Indonesia menargetkan interkoneksi jaringan listrik di pulau-pulau besar dapat terealisasi agar dapat memenuhi kebutuhan listrik diseluruh wilayah terutama pada pulau-pulau kecil di Indonesia. Langkah awal yang harus diperhatikan sebelum melakukan interkoneksi listrik pada pulau besar seperti pulau Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua yakni memastikan bahwa pulau-pulau kecil disekitarnya sudah teraliri listrik. Hal ini berguna meningkatkan rasio elektrifikasi di Indonesia.

Salah satu pulau kecil di makassar yang menjadi perencanaan interkoneksi Sulawesi adalah Pulau lae-lae yang berada di bagian barat kota Makassar, Sulawesi selatan. Pulau lae-lae merupakan sebuah pulau kecil yang terletak kurang lebih 1,5 km dari Makassar dengan luas 6,5 Ha. Dengan jumlah penduduk 1879 jiwa dan jumlah kk 401 dapat dikatakan Pulau Lae-lae mempunyai kepadatan penduduk cukup tinggi dan juga pulau ini dekenal dengan destinasi pariwisata maka secara otomatis akan mempengaruhi penggunaan listrik di wilayah tersebut.

Sistem kelistrikan di Pulau Lae-Lae ini masih bergantung pada PLTD dengan keterbatasan waktu yakni akan teraliri pada tiap rumah tangga mulai jam 18:00 Wita hingga pukul 06:00 wita membuat aktifitas listrik pada pulau ini akan berhenti pada saat siang hari. Maka perlu adanya interkoneksi antar Pulau Lae-Lae dan daratan Makassar sehingga kebutuhan listrik di wilayah tersebut dapat terpenuhi selama 24 jam. Dengan demikian penulis membuat RANCANGAN INTERKONEKSI JTM 20KV KABEL BAWAH LAUT DARI CENTRAL POINT- PULAU LAE-LAE.

1.2 Rumusan Masalah

- a. Bagaimana sistem kelistrikan di Pulau Lae-lae.

- b. Bagaiaman merancang interkoneski JTM 20 kV kabel bawah laut dari central Point ke pulau Lae-lae.

1.3 Tujuan Penilitan

- a. Untuk mengetahui bagaimana sistem kelistrikan di Pulau Lae-lae.
- b. Untuk merancang interkoneski JTM 20 kV kabel bawah laut dari central Point ke pulau Lae-lae.

1.4 Batasan Masalah

- a. Perancangan terbatas pada penyaluran jaringan tegangan menengah 20 kV (dengan menggunakan Jaringan bawah laut) *Central Point* – Pulau Lae-lae.
- b. Tidak merancang sistem Jaringan Tegangan Rendah pada Pulau Lae-Lae

1.5 Manfaat penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan perancangan jaringan interkoneksi JTM 20 kV bawah laut ke pulau Lae-Lae dan pulau kecil lainnya
- b. Menambah wawasan bagi penulis dalam merancang sistem interkoneksi JTM menggunakan kabel bawah laut
- c. Sebagai referensi bagi pihak-pihak yang ingin merancang jaringan interkoneksi bawah laut untuk pulau kecil

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuam penelitian, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini membahas tentang metode pengolahan data dalam penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang data yang diperoleh dan analisis dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini membahas tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan saran yang berkaitan dengan penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Deskripsi Umum JTM

Penggunaan dari suatu sistem tenaga listrik jaringan menengah merupakan suatu upaya untuk menghindari adanya rugi-rugi (*losses*) pada pendistribusian tenaga listrik ke penggunaan listrik pada suatu kawasan. Hal tersebut harus dipenuhi oleh PT PLN Persero selaku pemegang kuasa usaha utama dengan memiliki kualitas persyaratan tegangan sebagaimana diatur dalam UU ketenagalistrikan No. 30 Tahun 2009 (Menteri ESDM, 2009).

Standar tegangan menengah sebagai tegangan operasi yang digunakan di Indonesia yakni 20 kV, maka konstruksi dari JTM wajib memenuhi kriteria enjineriing keamanan ketenagalistrikan, termasuk didalamnya adalah jarak aman minimal antara Fase dengan lingkungan dan antara Fase dengan tanah, bila jaringan tersebut menggunakan saluran udara atau ketahanan isolasi jika menggunakan Kabel Udara Pilin Tegangan Menengah atau Kabel Bawah Tanah Tegangan Menengah serta kemudahan dalam hal pengoperasian atau Pemeliharaan Jaringan Dalam Keadaan Bertegangan (PDKB) pada jaringan utama. Dalam hal ini dimaksudkan adalah usaha menjaga keandalan kontinyuitas pelayanan konsumen. Selain dari ukuran dimensi konstruksi untuk pemenuhan syarat pendistribusian daya, juga wajib memperhatikan syarat ketahanan isolasi penghantar untuk ketahanan pada tegangan 20 kV.

Jaringan Tegangan Menengah pada sistem distribusi di Indonesia memiliki lingkup yang dimulai dari terminal keluar (*out-going*) pemutus tenaga dari transformator penurun tegangan dari Gardu Induk atau Transformator penaik tegangan pada pembangkit untuk sistem distribusi skala kecil, hingga ke peralatan seperti pemisah atau proteksi sisi masuk (*in-coming*) transformator distribusi 20 kV – 231/400 V. Terdapat 3 kelompok dalam pembagian konstruksi jaringan tenaga listrik jaringan menengah antara lain SUTM, SKUTM, dan SKTM (PLN Buku 5 2010).

2.1.1 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

SUTM atau Saluran Udara Tegangan Menengah merupakan konstruksi jaringan dengan biaya termurah dengan penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini merupakan konstruksi terbanyak yang digunakan oleh konsumen Tegangan Menengah terutama di Indonesia. Salah satu ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantartelanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton. Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan faktor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan seperti jarak aman minimum yang harus dipenuhi penghantar bertegangan 20 kV tersebut antar fase atau dengan bangunan atau dengan tanaman atau dengan jangkauan manusia. Termasuk dalam kelompok yang diklasifikasikan SUTM adalah juga bila penghantar yang digunakan adalah penghantar berisolasi setengah AAAC-S (*half insulated single core*). Penggunaan penghantar ini tidak menjamin keamanan terhadap tegangan sentuh yang dipersyaratkan akan tetapi untuk mengurangi resiko gangguan temporer khususnya akibat sentuhan tanaman (PLN Buku 1, 2010).

2.1.2 Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SUKTM)

Keandalan penyaluran sistem tegangan menengah dapat ditingkatkan dengan adanya SUKTM, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi setengah pada konstruksi jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah 20 kV, dapat juga digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Berat kabel pilin menjadi pertimbangan terhadap pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton penopangnya (Nurmiati,2018).

2.1.3 Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah

Konstruksi kabel tanah ini merupakan konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan jaringan listrik tegangan menengah, namun biaya relatif mahal dengan penyaluran daya yang sama. Hal ini disebabkan karena penggunaan konstruksi kabel tanah ini memiliki konstruksi dengan isolasi penghantar per fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan, namun pada rentang biaya yang diperlukan maka konstruksi ditanam langsung memiliki biaya termurah dibanding dengan penggunaan conduit atau tunneling (terowongan beton).

Penggunaan saluran kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik adalah upaya utama peningkatan kualitas pendistribusian. Dibandingkan dengan konstruksi dari jaringan saluran udara tegangan menengah, penggunaan dari SKTM akan memperkecil resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal/meningkatkan keamanan ketenagalistrikan. Secara garis besar, termasuk dalam kelompok SKTM adalah (PLN Buku 5,2010):

1. SKTM bawah tanah – *underground MV Cable*.
2. SKTM laut – *Submarine MV Cable*

Selain lebih aman, namun penggunaan SKTM lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama, sebagai akibat konstruksi isolasi penuh penghantar per fase dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan sesuai keamanan ketenagalistrikan. Penerapan instalasi SKTM seringkali tidak dapat lepas dari instalasi saluran udara tegangan menengah sebagai satu kesatuan sistem distribusi sehingga masalah transisi konstruksi diantaranya tetap harus dijadikan perhatian

2.2 Teori Umum Kabel Bawah Laut

Fungsi utama dari kabel laut adalah untuk menyalurkan energi listrik menuju konsumen atau ke beban listrik. Suatu kemampuan kabel harus memiliki kemampuan untuk mengurangi panas secepat mungkin, hal ini disebabkan karena pada penyaluran listrik yang berupa daya listrik terdapat panas yang akan menyebabkan rugi-rugi. Pemasangan dan instalasi dari kabel sendiri akan mempengaruhi kemampuan dari suatu kabel untuk menghilangkan panas. Maka dari itu suatu kabel listrik harus memiliki persyaratan sebagai berikut (Purnamawati, 1992):

- a. Mempunyai kekuatan dielektrik tinggi.
- b. Mempunyai kemampuan menghantar yang baik.
- c. Mempunyai ketahanan terhadap korosi dan api.
- d. Mempunyai kemampuan mekanis yang tinggi.

Adapun persyaratan yang harus dipertimbangkan dalam memilih jenis kabel laut yang di gunakan, sebagai berikut (Efendy, 2000):

- a. Mempertimbangkan segi ekonomis sistem, maka kabel harus didesign dengan *losses* yang rendah dan juga di perlukan tingkat keamanan yang tinggi agar mengurangi tingkat kerusakan mengingat biaya perbaikan yang mahal, bahkan memungkinkan tidak diadakan perbaikan.
- b. Harus memiliki ketahanan mekanis dan elektrik terhadap kemungkinan terjadinya pembengkokan pada tarikan putir dan gulungan yang dapat terjadi pada waktu pembuatan kabel maupun penggelaran kabel.
- c. Dapat tahan terhadap tekanan air pada bagian terdalam dari route kabel dan kedap air sepanjang route kabel agar tidak terjadi integritas listrik akibat adanya deformasi.
- d. Bila mungkin dikehendaki tanpa ada site joint sehingga hanya terdapat faktor joint, mengingat site joint terkadang merupakan titik lemah dari instalasi kabel. Dengan demikian kabel tersebut merupakan satu kesatuan panjang pada route tersebut yang di bawa oleh kapal khusus penggelar kabel ke site.
- e. Desiain armour harus cukup kuat untuk menahan kemungkinan pengaruh mekanis dari luar seperti jangkar kapal kecil didekat pantai, alat perangkap ikan, tekanan sisi kabel pada waktu penggelaran kabel dan tumpukan pada dasar laut yang berkarang.
- f. Kabel dan peralatannya harus didesing sedimikian rupa untuk mengantisipasi apabila metal sheath rusak waktu beroperasi, penetrasi air dari titik masuknya air tidak gampang meluas.
- g. Kabel harus di letakan dengan besar sudut 30° - 60° dan tetap terjaga agar regangan tension pada kabel tidak berlebihan.
- h. Harus tahan terhadap arus air dan tidak dapat mengubah formasi terhadap tekanan air pada kedalaman laut yang paling dalam. Kabel dengan mudah terkikis dan menyebabkan penurunan kabel sebagai penghantar listrik.
- i. Pelindung pada kabel tahan terhadap korosi.

2.3 Jenis Jenis Kabel Laut

Jenis-jenis kabel laut secara umum diklasifikasikan menjadi 4 jenis menurut isolasi yang digunakan pada lapisan kabel atau juga pendingin untuk menahan panas dari daya yang di alirkan. Jenis –jenis kabel tersebut antara lain Kabel Laut dengan Isolasi Kertas Diimpregnasi, Kabel Laut Berisolasi minyak (*Oil filled cable*), Kabel Laut Berisi Gas (*Gas filled Cable*), dan Kabel Laut dengan Isolasi Extruded Dielektrik (Efendy, 2000).

2.3.1 Kabel Laut dengan Isolasi Kertas Diimpregnasi

Kabel laut ini diisolasi dengan kertas yang diimpregnasi dengan kompon pekat atau senyawa zat polyisobuthylene dengan minyak. Jenis kabel ini biasanya banyak di gunakan untuk transmisi arus searah. Adapun karaktekristik dari kabel ini adalah (Thio, 2001):

- a. Untuk tegangan searah (DC), kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh isolasi adalah ± 20 kV/mm dan tegangan kerja DC dapat mencapai ± 266 kV.
- b. Untuk tegangan bolak-bolik (AC), kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh isolasi adalah ± 2.5 kV/mm dan tegangan kerja AC dapat mencapai ± 50 kV.

2.3.2 Kabel Laut Berisolasi Minyak

Kabel jenis ini memiliki penghantar yang berupa hollow konduktor. Minyak yang digunakan pada kabel dapat bertekanan rendah atau juga tinggi. Bila tekanan minyak tinggi, maka kekuatan medan listrik yang dapat ditahan isolasi juga tinggi. Jenis kabel ini banya digunakan untuk tegangan tinggi dan tegangan extra tingggi bahkan mencapai ± 750 kV. Adapun karakteristik dari kabel ini adalah (Thio, 2001):

- a. Untuk tegangan searah (DC), kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh isolasi adalah ± 30 kV/mm dan tegangan kerja DC dapat mencapai ± 500 kV
- b. Untuk tegangan bolak-balik (AC), kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh isolasi adalah ± 2.5 V/mm dan tegangan kerja AC dapat mencapai ± 750 kV.

2.3.3 Kabel Laut Berisi Gas

Kabel jenis ini memiliki jenis penghantar hollow konduktor, dan gas yang dipergunakan adalah gas helium dan nitrogen sebagai pendingin kabel. Jenis kabel

ini sangat cocok dengan kedalaman laut sekitar 300-400m. Adapun karakteristik dari kabel ini adalah (Thio, 2001):

- a. Untuk tegangan searah (DC), kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh isolasi adalah ± 25 kV/mm dan tegangan kerja DC dapat mencapai ± 250 kV
- b. Untuk tegangan bolak-balik (AC), kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh isolasi adalah ± 12 kV/mm dan tegangan kerja AC dapat mencapai ± 300 kV.

2.3.4 Kabel Laut dengan Isolasi Extrude Dielektrik

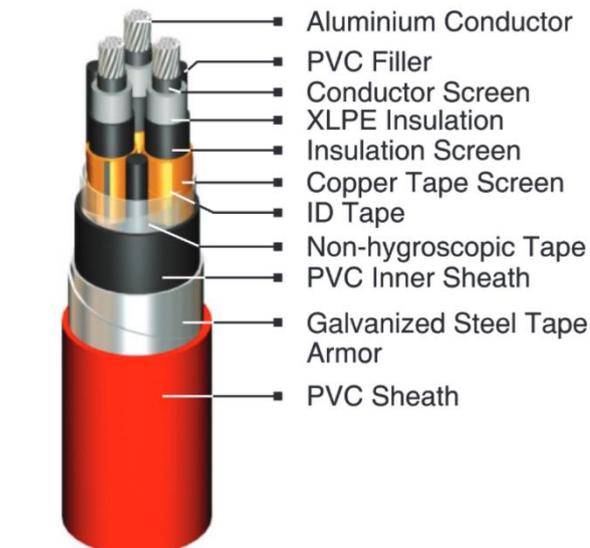
Kabel ini memiliki karakteristik yang lebih ringan dan fleksibel dibanding dengan kabel minyak dan biaya pemeliharaan yang cukup murah di banding dengan kabel minyak. Kelebihan kabel ini juga memiliki kekuatan mekanis yg lebih besar dibanding kabel impregnasi kertas dengan ketebalan isolasi yang sama kuat medan listrik lebih besar, dan juga untuk kelas tegangan yang sama, kabel ini memiliki diameter lebih kecil di banding dengan jenis kabel laut lainnya. Kabel laut ini sangat cocok untuk tegangan rendah dan tegangan menengah yakni hingga 138 kV AC (Thio, 2001).

2.4 Konstruksi Kabel Laut

Konstruksi dari kabel laut jauh berbeda dengan kabel listrik pada umumnya. Pembuatan kabel bawah laut wajib sesuai dengan aturan dari *IEC Standard 60288*, desain dan pembuatan dari kabel ini memang di tujuhkan untuk penggunaan di dalam air, baik di letakan di atas dasar laut atau ditanam pada dasar bawah laut. Sesuai dengan standar IEC 60288, konstruksi kabel laut wajib tahan terhadap aktivitas gempa, aktivitas gunung berapi bawah laut, hewan laut, dan juga ranjau atau jaring pelaut. Kabel laut juga dapat tahan terhadap topografi dasar laut yang kasar dan bebatuan (Ma'ruf, 2019).

Dalam perkembangannya khususnya Kabel Laut jenis Isolasi Plastik yang menggunakan *crossing-linking polyethyelen* sedang dikembangkan teknik pembuatannya. Hal ini membuat kecenderungan kabel minyak yang dapat

menyalurkan tegangan 275 kV segera diganti dengan jenis *crossing-linking polyethylen* (Joto, 2014).



Gambar 1 Konstruksi Kabel Laut

2.4.1 Penghantar

Pada industri listrik, jenis penghantar yang banyak digunakan untuk menyalurkan daya listrik adalah kawat tembaga dan aluminium. Tembaga memiliki tingkat penghantar yang tinggi dan mudah disambung juga mudah dalam penanganan terminalnya. Selain itu tembaga juga merupakan penghantar dengan konduktivitas yang tinggi, modulus elastisitas yang lebih besar, dan juga memiliki koefisien pengembangan panas yang lebih kecil dengan diameter kecil dari pada aluminium dengan penyaluran daya yang sama. Berikut contoh-contoh logam dengan penghantar listrik yang tinggi, berat jenis, dan jenis tahanan (Purnamawati, 1992):

Table 1 Tahanan Jenis dan Berat Logam.

Logam	Tahanan Jenis	Berat Jenis
Perak	1,629 10^{-6} Ohm.cm	10,5 gr/ cm ³
Tembaga	1,724 10^{-6} Ohm.cm	8,9 gr/ cm ³
Aluminium	2,828 10^{-6} Ohm.cm	2,7 gr/ cm ³
Nikel	6,884 10^{-6} Ohm.cm	8,9 gr/ cm ³

2.4.2 Isolasi

Isolasi pada kabel listrik merupakan bahan yang memisahkan muatan listrik pada suatu penghantar satu dengan lainnya secara kontiniu. Isolasi juga berguna untuk memisahkan antara penghantar agar tidak terjadi lonjatan api. Kaulitas dari bahan isolasi dapat menurun karena adanya kelmbaban, oksidasi dan pengaruh lainnya (Purnamawati, 1992).

Pada kabel laut, jenis isolasi yang di pakai adalah isolasi kertas dan isolasi sinteis yang dikombinasikan dengan minyak atau pun gas. Kertas isolasi yang digunakan dapat berupa kertas kering ataupun kertas yang diresapi minyak. Kekuatan dielektrik dari kertas tergantung pada ketebalan, kepadatan ketahanan terhadap air (*impermeabilitas*), kekuatan Tarik (*tensile strength*), kemuluran (*elongation*), permitivitas relative, faktor disipasi dan kekuatan tembus listriknya (Kevin 2013).

Dengan kemajuan teknologi, kabel laut berisolasi sintetis mulai banyak digunakan. dibanding dengan isolasi kertas, jenis isolasi sintetis lebih fleksibel, tidak menyerap air, faktor rugi-rugi lebih kecil, dan harga yang murah dengan kekuatan tegangan dan daya yang sama. Untuk saluran tegangan tinggi, jenis isolasi menggunakan bahan polyethyelen (PE), cross-link polyethyelen (XLPE), butly rubber, dan ethylene propylene rubber (Thio, 2001).

2.4.3 Pelindung Kabel

Kabel laut memiliki dua pelindung yakni perisai (*armour*) dan selubung (*sheath*). Pelindung yang berupa selubung ini digunakan untuk memberikan perlindungan terhadap gangguan mekanis. Sedangkan pelindung yang berupa perisia dengan kawat baja digalvanisir dan juga dilapisi lagi dengan polypropylene yang dapat tahan akan gaya tarik yang timbul, dan juga bersifat fleksibel serta dapat melindungi kabel dari korosi.

Pada selubung kabel terdapat dua jenis bahan yakni timah dan juga bahan sintetis extruded polypropylene. Selubung kabel yang menggunakan bahan sintetis dapat tahan terhadap bahan kimia, percikan api serta tahan lama, tetapi kekuatan mekanis belum cukup di banding dengan logam. Namun kerugian menggunakan

bahan logam adalah dapat timbul arus eddy pada selubung tersebut. Maka dari itu pelindung kabel sangatlah penting jika dibandingkan dengan konduktornya, dikarenakan kerusakan yang terjadi pada kabel bawah laut adalah kerusakan mekanis pada pelindungnya (Efendy, 2001).

2.4.4 Pemasangan Kabel Laut

Penggelaran kabel laut pada umumnya menggunakan sebuah kapal (*laying vessel*) yang dilengkapi dengan peralatan untuk menggelar kabel sekaligus untuk mengangkat kabel serta juga digunakan untuk mengoperasi penggelaran kabel laut. Biasanya juga dilengkapi dengan kapal kecil (*tug boat*) untuk membantu dalam navigasi route kabel yang telah direncanakan. Dalam penggelaran kabel, kapal akan mengikuti rute yang telah ditentukan sebelumnya dengan memasang peralatan ukur jarak elektronik yang telah di pasang pada titik-titik yang telah disurvei sebelumnya, titik tersebut berguna untuk mengetahui posisi kapal penggelar secara tepat pada jalur kabel yang telah direncanakan (Efendy,2001).

Sebelum kabel didaratkan (*landing*) terlebih dahulu dilakukan:

- a. Pengukuran panjang kabel yang akan dipotong, dari perahu penggelar hingga ketitik terminal.
- b. Memasang seling penarik untuk mengatur pendaratan kabel.
- c. Menurunkan ujung kabel diatas pelampung-pelampung yang diapasang untuk persiapan pemotongan kabel diatas kapal.

Penanaman kabel laut mempunyai keuntungan yaitu dalam pengoperasiannya dapat mengurangi tegangan lebih (*tension*). Metode penanaman kabel laut pertama kali dilakukan pada daerah pantai atau sepanjang ± 20 meter dengan menggunakan peralatan water jet type equipment pada kedalaman 1,5 meter. *Water jet type equipment* akan membuat parit-parit didasar laut. Roller digunakan untuk melengkapi parit agar kabel dapat mudah ditarik. Adapun metode-metode penanaman kabel laut sebagai berikut (Purnamwati,1992):

a. *Direct Towing Method*

Pada metode ini penanaman kabel ditarik secara langsung oleh kapal dan metode ini secara normal pada waktu penggelaran kabel laut.

b. *Fixed Towing Method*

Pada metode ini, penanaman kabel ditarik dengan kapal, dimana jangkar diletakkan sekitar 1 km di depan kapal. Dan metode ini dapat diaplikasikan untuk penanaman kabel laut selama penggelaran dan setelah penggelaran.

c. *Under-running Method*

Pada metode ini, penanaman kabel ditarik dengan kapal pada saat kapal ditahan oleh kabel yang digantung, berarti kabel diikat untuk dilokasikan didepan penanaman kabel laut selama penggelaran.

d. *Fixed Towing by Under-Running Method*

Metode ini menggabungkan fixed towing dan under-running method, dimana dapat mengurangi pergeseran (deviasi). Metode ini diaplikasikan pada saat pengoperasian penanaman kabel setelah dilakukan penggelaran kabel laut.

terdapat juga sistem proteksi pada saat pemasangan kabel laut sebagai berikut:

a. Di pantai

Kabel dilindungi dengan pipa besi dan ditanam di pasir sedalam 1 meter dengan menggunakan jet lift dan air lift

b. Pada kedalaman 0-20 meter

Kabel diberi pemberat dengan:

1. Interval 10-25 meter pada kedalaman 20-40 meter.
2. Interval 25-50 meter pada kedalaman lebih dari 40 meter

Tujuan dari pemasangan kantong-kantong semen untuk meningkatkan stabilitas dari suatu kabel. Selain cara-cara tersebut, pemasangan kabel laut memiliki batasan span maksimum untuk menggantung, dikarenakan adanya arus air yang dapat merusak isolasi kabel laut. Berdasarkan perhitungan stabilitas didasar laut, maka span maksimum kabel menggantung adalah 7 meter dengan ketinggian maksimum dari dasar laut sebesar 1 meter. Untuk melindungi kabel yang terbuka pada kedalaman lebih dari 20 meter, maka ditempatkan larangan membuang jangkar di jalur kabel laut tersebut.

2.4.5 Sebab-Sebab Kerusakan Pada Kabel Laut

Adapun kerusakan yang biasa terjadi pada kabel laut sebagai berikut (Thio, 2001):

- a. Penggoresan, hal ini biasanya terjadi apabila lokasi pemasangan dari kabel terletak didasar laut yang berbatu karang yang apabila dipengaruhi oleh ombak atau arus air akan menyebabkan terjadi pergoresan pada kabel
- b. Korosi atau peristiwa memberukuknya suatu logam atau sifat-sifatnya, dikarenakan reaksi dengan lingkungan sekitarnya. Dengan adanya kerusakan pada kawat armour dapat dikatakan kekuatan dan ketahanan kabel laut terhadap kerusakan mekanis menjadi berkurang
- c. Peristiwa kabel laut yang berbelit. Hal ini diakibatkan karena adanya pengendoran kabel yang berlebihan pada saat dilakukannya penggelaran kabel dari atas kapal yang disebabkan karena adanya pengaruh ombak yang menghantam badan kapal. Hal ini mengakibatkan terbelitnya kabel sehingga membuat lapisan-lapisan kabel laut rusak.
- d. Jangkar kapal dan nelayan merupakan salah satu akibat sering terjadinya kerusakan pada kabel laut. Walaupun pada umumnya kabel laut yang diletakkan didasar laut selalu akan dinyatakan dalam peta-peta laut dan navigasi terutama yang dekat dengan pelabuhan dan juga daerah nelayan, akan tetapi karena adanya keteledoran atau tidak sengaja maka kapal-kapal akan membuang jangkar dan mengenai kabel sehingga dapat merusak kabel tersebut.

2.5 Karakteristik Elektris Kabel Laut

2.5.1 Resistansi DC

Resistansi merupakan tahanan pada penyaluran distribusi yang dapat menyebabkan kerugian daya. Kerugian ini tergantung pada besarnya tahanan dari panjang, luas penampang serta kawat penghantar yang digunakan pada saluran tersebut. Penghantar sendiri mempunyai nilai impedansi yang terdiri dari resistansi. Besaran resistansi dapat di tuliskan sebagai berikut (Mangera, 2019):

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

Dimana:

R= Resistansi kawat (Ω/m)

A= Luas penampang kawat penghantar (mm^2)

ρ = Tahanan jenis kawat penghantar ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

l = Panjang kawat penghantar (m)

Untuk resistansi DC per unit pada panjang konduktor yang di pengaruhi oleh suhu dapat dituliskan (Lutfhi, 2018):

$$R' = R_{20}[1 + \alpha_{20}(t - 20)] \quad (2)$$

Dimana:

R' = Resistansi DC konduktor pada suhu θ (Ω/m)

α_{20} = Koefisien temperatru bahan pada 20°C (Ω/m)

t = Temperatur maksimum ($^\circ$)

R_{20} = Resistansi konduktor DC pada 20°C (Ω/m)

2.5.2 Resistansi AC

Pada jaringan listrik AC terdapat dua fenomena yang dapat membuat meningkatnya resistansi pada kawat konduktor, fenomena itu disebut fenomena efek kulit (*skin effect*) dan efek permukaan (*proximity effect*). Fenomena *skin effect* (efek kulit) merupakan fenomena disaat fluks lingkup dipusat penghantar lebih besar dari fluks lingkup disekitarnya sehingga kerapatan arus AC pada penghantar tidak merata, hal ini dapat menyebabkan tahanan AC lebih besar dari tahanan DC. Sedangkan fenomena *proximity effect* (efek permukaan) adalah fenomena disaat medan magnet yang ditimbulkan oleh arus penghantar lain yang berdekatan akan menyebabkan kerapatan arus AC pada penghantar tidak merata (Putra, 2017)

Sehingga tahanan efektif penghantar AC dapat di tuliskan sebagai berikut (Lutfhi, 2018):

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (3)$$

Dimana:

R = Resistansi AC (Ω)

R' = Resistansi DC (Ω)

y_s = Faktor *skin effect*

y_p = Faktor *proximity effect*

Untuk menentukan nilai dari factor *skin effect*, maka dibutuhkan nilai dari reaktansi *skin effect* dari suatu penghantar, maka digunakan persamaan sebagai berikut (Achmad Nashihuddin dkk, 2022):

$$X_s^2 = \frac{8.\pi.f}{R_{dc}} 10^{-7}.K_s \quad (4)$$

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192+K_p.X_s^4} \quad (5)$$

Dengan K_s adalah nilai dari konstanta pejal suatu penghantar. Untuk menentukan bilangan dari factor. Untuk menentukan Faktor *proximity effect* digunakan persamaan sebagai berikut:

$$yp = ay^2(0,312y^2 + \frac{1,18}{a+0,27}) \quad (6)$$

Dimana :

$$a = \frac{X_p^4}{192+0,8X_s^4}, y = \frac{d_c}{s}, \text{ dan } X_p = \sqrt{\frac{8.\pi.f}{R_{dc}}} 10^{-7}.K_p \quad (7)$$

a dan Fk merupakan fungsi dari perhitungan untuk efek permukaan, X_p menyatakan fungsi Bessel, d_c adalah diameter luar konduktor (m), s adalah jarak antara konduktor dalam satu sistem (m), K_s dan K_p adalah konstanta efek kulit dan efek dari permukaan dan f adalah frekuensi suatu sistem dengan hal ini adalah 50 Hz

2.5.3 Induktansi

Induktansi pada konduktor pada umumnya untuk mengetahui besaran fluks yang di hasilkan oleh arus yang mengalir pada saluran tersebut (Hardianto, 2019). Pada kawat penghantar terdapat dua jenis induktansi, yakni induktansi sendiri (*selfinductance*) dan juga induktansi mutual (*mutual inductance*).

2.5.4 Kapasitansi

Kapasitansi merupakan akibat selisih potensial antara penghantar sehingga menyebabkan penghantar tersebut bermuatan. Apabila suatu saluran daya yang mempunyai panjang penghantar dibawah 80 km, maka nilai kapasitansinya dapat diabaikan dikarenakan nalainya yang sangat kecil, sedangkan untuk saluran yang cukup panjang dan memiliki tegangan yang cukup tinggi di atas (30 kV) maka kapasitansinya harus diperhitungkan (Hardianto, 2019).

2.5.5 Temperatur Kabel Laut

Ketergantungan dari bahan isolasi dari suatu kabel akan mempengaruhi harga dari temperatur operasi dari suatu kabel. Temperatur kabel juga berpengaruh pada penekukan konduktor bilamana akan membuat kenaikan temperatur yang tinggi sehingga akan memungkinkan kegagalan isolasi akibat terbakar dan juga kawat penghantar akan meleleh (Asril 2019). Panas dari kabel biasanya diasumsikan bahwa semua energi input yang berupa panas akan diserap oleh konduktor kabel. Adapun tabel 2.4 memperlihatkan temperature maksimum konduktor pada kabel (Efendy, 2000).

Table 2 Temperature *maksimum konduktor pada kabel*

Isolasi	Desain kabel	Temperatur maksimum konduktor (°C)
impregnated paper (Uo/U):		
0.61, 1.8/3, 3.6/6	Belted	80
6/10	Belted	65
6/10, 8.7/15	Screened	70
12/20, 18/30 MIND	Screened	65
poly (vinly chloridc)	All	70
polyethylene	All	70
Butly rubber	All	85
Ethylene-propylene rubber	All	90
crosslinked polyethylene	All	90
Natural rubber	All	60

2.5.6 Kemampuan Hantar arus

Dalam penyaluran daya listrik, kemampuan penyaluran tidak terlepas dari Kemampuan Hantar Arusnya (KHA) dikarenakan terdapat pengaruh oleh arus yang membawa tenaga listrik. Perhitungan kuat arus dilakukan untuk menentukan besar arus maksimal yang di dapat dihantarkan oleh kabel. Untuk menghitung kuat hantar arus kabel bawah laut berinti 3, maka digunakan persamaan sebagai berikut (Achamad Nasuddin Akmal dkk, 2022):

$$I = \sqrt{\frac{\Delta t - Wd(0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4))}{R_c T_1 + 3R(1 + \lambda_1)T_2 + 3R(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \quad (8)$$

Dimana:

- Δt : perbandingan temperatur keseluruhan suhu, menurut PUIL (2000)
temperature maksimum konduktor (θ) 90°
- T_1 : Nilai resistansi thermal per satuan panjang antara konduktor dan selubung logam (K.m/W)
- T_2 : Nilai resistansi thermal per satuan panjang antara lapisan selubung logam dan persiai (K.m/W)
- T_3 : Nilai resistansi thermal per satuan panjang luar kabel (K.m/W)
- T_4 : Nilai resistansi thermal per satuan panjang antara permukaan kabel dengan media sekeliling kabel (K.m/W)
- n : Jumlah konduktor
- λ_1, λ_2 : Perbandingan faktor rugi-rugi *sheat* dan *armour*
- R : Resistansi AC pada temperature operasi konduktor per satuan panjang
- W_d : Rugi dielektrik bahan (W/m)

Pada rugi dielektrik muncul Ketika kabel dialiri arus, namun untuk menghitung rugi dielektrik pada kabel maka dibutuhkan nilai kapasitansi dari isolasi kabel tersebut. Nilai kapsitansi isolasi dapat di tulisakan sebagai berikut (Ananda Rizky dkk,2021):

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left(\frac{D_e}{d_c} \right)} \times 10^{-9} \quad (9)$$

Dimana:

- D_e : Diameter isolasi
- d_c : Diameter konduktor

Sehingga nilai W_d adalah:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (10)$$

Dimana:

- ω : $2\pi f$
- U_0 : Tegangan kerja antar penghantar fase dengan tanah atau lapisan logam

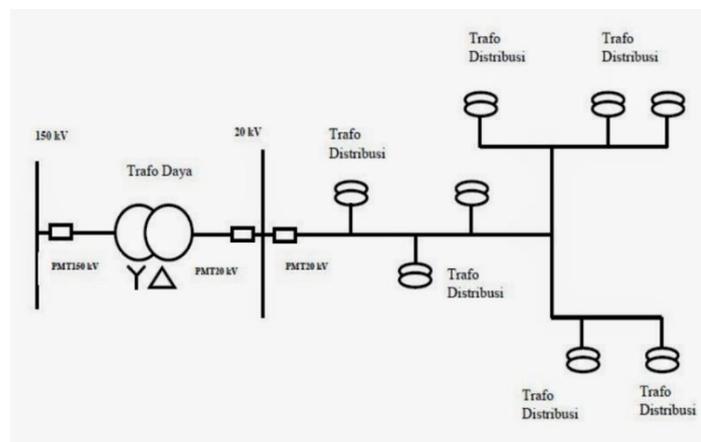
$\tan\delta$: Faktor rugi isolasi

2.6 Jaringan Distribusi

Secara sederhana penyaluran tegangan tenaga listrik ke beban (konsumen) terdiri dari beberapa sistem yakni sistem pembangkit, sistem transmisi, sistem distribusi lalu menuju ke beban (konsumen), sehingga sistem ini menjadi satu kesatuan membentuk sistem tenaga listrik. sistem distribusi merupakan sistem yang mendistribusikan tenaga listrik ke konsumen atau pengguna (PLN, 2010).

Berdasarkan bentuk jaringannya, jaringan distribusi di bagi menjadi beberapa bagian yakni (Suswanto, 2009):

a. Sistem Jaringan Radial

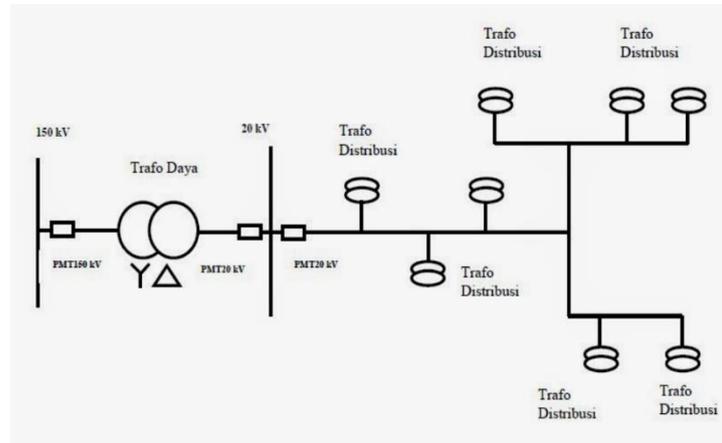


Gambar 2 Sistem Jaringan Radial

Sistem radial pada jaringan distribusi merupakan sistem terbuka, dimana tenaga listrik yang disalurkan secara radial melalui gardu induk ke konsumen-konsumen dilakukan secara terpisah satu sama lainnya. Sistem ini merupakan sistem yang paling sederhana diantara sistem yang lain dan paling murah, sebab sesuai konstruksinya sistem ini menghendaki sedikit sekali penggunaan material

listrik, apalagi jika jarak penyaluran antara gardu induk ke konsumen tidak terlalu jauh.

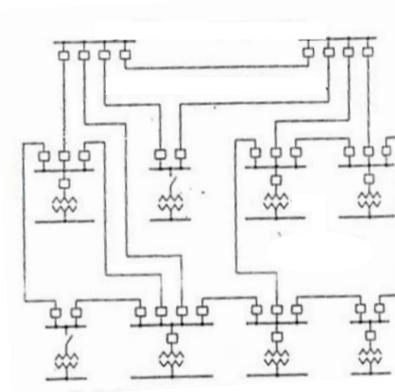
b. Sistem Jaringan Tertutup



Gambar 3 Sistem Jaringan Tertutup

Sistem *loop* dapat menyalurkan daya listrik melalui satu atau dua saluran feeder yang saling berhubungan, menguntungkan dari segi ekonomis, bila terjadi gangguan pada saluran maka saluran yang lain dapat menggantikan untuk menyalurkan daya listrik di mana konstinuitas penyaluran daya listrik lebih terjamin. Dan bila digunakan dua sumber pembangkit, kapasitas tegangan lebih baik dan regulasi tegangan cenderung kecil. Dalam kondisi normal beroperasi, pemutus beban dalam keadaan terbuka.

c. Sistem Jaringan Network/Mesh

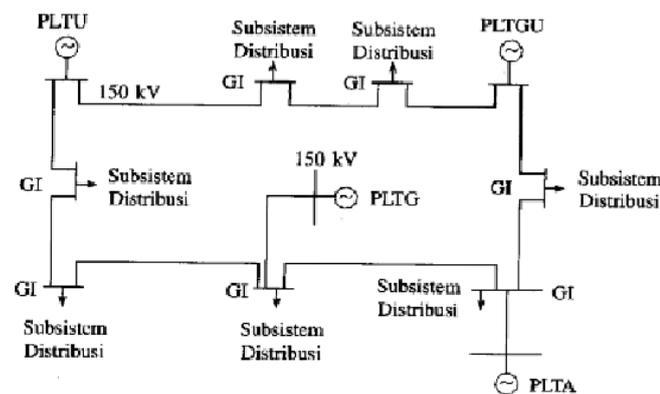


Gambar 4 Sistem Jaringan Network/ Mesh

Sistem network/mesh ini merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan secara terus-menerus oleh dua atau lebih feeder pada gardu-gardu induk

dari beberapa Pusat Pembangkit Tenaga Listrik yang bekerja secara paralel. Sistem ini merupakan pengembangan dari sistem-sistem yang terdahulu dan merupakan sistem yang paling baik serta dapat diandalkan, mengingat sistem ini dilayani oleh dua atau lebih sumber tenaga listrik. Selain itu jumlah cabang lebih banyak dari jumlah titik feeder.

d. Sistem Jaringan Interkoneksi



Gambar 5 Sistem Jaringan Interkoneksi

Pada sistem interkoneksi ini pusat pembangkit tenaga listrik bekerja bergantian secara teratur sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan. Apabila beban normal sehari-hari dapat diberikan oleh pusat pembangkit tenaga listrik tersebut, hal ini dapat membuat ongkos pembangkitan dapat diperkecil. Sehingga tidak ada Pusat Pembangkit yang bekerja terus-menerus. Cara ini akan dapat memperpanjang umur Pusat Pembangkit dan dapat menjaga kestabilan sistem pembangkitan.

2.7 Rugi-Rugi Jaringan Distribusi

Pembangkit listrik yang sangat jauh dari konsumen (pembebanan) akan mengakibatkan kehilangan energi atau rugi-rugi energi, maka demikian di perlukan adanya prediksi dan antisipasi agar hal tersebut dapat berlangsung secara normal dan wajar. Rugi-rugi energi atau jatuh tegangan sendiri merupakan energi yang hilang karena ada tekanan atau resistansi dari sistem jaringan dan transformator yang mana hal ini tidak mungkin untuk dihindari (Hontong, 2015).

Untuk menentukan rugi-rugi daya pada jaringan distribusi pada jaringan tegangan menengah menggunakan persamaan sebagai berikut (Abdurrahman, 2020):

$$P_{losses} = I^2 \times R \quad (11)$$

Dimana:

P_{losses} = Rugi-rugi Daya (Watt)

I = Arus Pada Saluran (A)

R = Resistansi Total (Ω)

Drop Tegangan adalah selisih antara tegangan kirim dengan tegangan yang diterima pada suatu jaringan distribusi. Penyebab utama terjadinya jatuh tegangan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain yaitu arus, impedansi dan jarak sautu saluran. Persamaan *Drop Voltage* atau jatuh tegangan dapat di tulisakan sebagai berikut (Effendi dkk, 2017):

$$V\Delta = \sqrt{3} \times I \times L (R\cos\phi + X \sin\phi) \quad (12)$$

Dimana:

$V\Delta$: Jatuh Tegangan (V)

R : Resistansi saluran (Ω)

X : Reaktansi saluran (Ω), dimana $X_L : \omega L$

I : Arus beban penuh

L = Panjang saluran

Dikarenakan pada tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan yang dikirim (V_s) yang disebabkan oleh resistansi dari saluran, sehingga jatuh tegangan (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengirim (*sending send*) dan tegangan pada ujung penerima (*receiving end*). Maka dari itu dapat dituliskan persmaan jatuh tegangannya adalah (Latupeirissa, 2018):

$$V\Delta = V_s - V_r \quad (13)$$

Tegangan jatuh juga relatif dinamakan dengan regulasi tegangan V_R (*voltage regulation*) dan dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_R = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (14)$$

Dimana:

V_s = tegangan pada pangkal pengirim

V_r = tegangan pada pangkal penerima

2.8 Pembebanan Transformator

Efisiensi pembebanan transformator yang baik dapat diperoleh melalui pemilihan kapasitas transformator distribusi yang sesuai dengan beban konsumen. Persentase pembebanan transformator didapatkan melalui perbandingan antar daya terpasang dengan kapasitas transformator distribusi dan dinyatakan melalui persamaan berikut (Widiatmika, 2018):

$$\%Pembahanan = \frac{LT}{PT} \times 100\% \quad (15)$$

Keterangan:

%Pembahanan = Persentase pembebanan transformator distribusi (%)

LT = Load transformator (VA)

PT = Kapasitas transformator distribusi (VA)

Daya transformator distribusi dapat ditinjau melalui tegangan tinggi (primer) dengan rumus sebagai berikut (Julianto, 2016):

$$S = \sqrt{3}VI \text{ atau } S = P / \cos\theta \quad (16)$$

Dimana :

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi primer transformator (kV)

I = arus jala-jala (A)

$\cos \theta = 0,8$

2.9 Batimetri

Topografi dasar laut atau batimetri, jenis material dasar laut, dan morfologi dasar laut merupakan suatu fenomena yang dapat ditemukan pada permukaan perairan sedangkan proses penggambaran dasar perairan sejak dilakukan pengambilan, pengolahan hingga visualisasinya disebut survei batimetri yang mana gambar tersebut dapat disajikan dalam garis-garis kontur atau model permukaan digital (Poerbandono dan Djunarsjah, 2005).

2.10 Peramalan Kebutuhan Listrik

2.10.1 Pertumbuhan Eksponensial

Prediksi penduduk merupakan perkiraan jumlah penduduk di masa yang akan datang. Prediksi yang baik menghasilkan penyimpangan antara hasil ramalan dan kenyataan sekecil mungkin. Perhitungan prediksi penduduk menggunakan model geometri dengan persamaan sebagai berikut (Hirarti, 2019) :

$$P_n = P_0 (1 + r)^n \quad (17)$$

Dimana:

P_n = jumlah penduduk tahun yang akan diprediksi

P_0 = jumlah penduduk tahun pertama

r = laju pertumbuhan penduduk

n = periode antara tahun pertama dan tahun yang akan diprediksi

Dalam menentukan laju pertumbuhan penduduk, biasanya pertumbuhan penduduk pada tahun peramalan dianggap konstan. Pada pola kecenderungan pertumbuhan penduduk di tahun-tahun sebelumnya menjadi pertimbangan dalam menentukan nilai laju dari pertumbuhan penduduk. Berdasarkan data jumlah penduduk pada tahun sebelumnya, maka persamaan dari laju pertumbuhan komulatif dapat ditentukan dari persamaan sebagai berikut (Sumartanto, 2014):

$$r = \left(\sqrt[n]{\frac{P_0}{P_n}} - 1 \right) \times 100\% \quad (18)$$

Dimana:

r = perumbuhan penduduk (%)

P_n = jumlah penduduk pada akhir data historis

P_o = jumlah penduduk pada awal data historis

n = jumlah banyak data (tahun)

2.10.2 Pertumbuhan PDRB

Produk Domestik Regional Bruto atau disingkat dengan PDRB dapat didefinisikan sebagai nilai dari produksi netto sebuah barang dan juga jasa yang diperoleh berbagai unit produksi dalam suatu wilayah / regio dalam jangka waktu tertentu (Sumartano, 2014). Laju dari pertumbuhan PDRB akan berpengaruh pada kenaikan output perkapita dalam jangka panjang. Pertumbuhan ekonomi akan dilihat dalam kurun waktu tertentu untuk dianalisa sehingga kebijakan-kebijakan ekonomi yang diterapkan pemerintah dapat mendorong perekonomian domestik yang dinilai efektifitasnya (Putra, 2016).

Unit produksi dikelompokkan menjadi 9 lapangan usaha yaitu (Sumartono, 2014):

- 1 Pertanian,
2. Pertambangan dan penggalian,
3. Industri pengolahan,
4. Listrik, gas dan air bersih,
5. Bangunan,
6. Perdagangan, hotel dan restoran,
7. Pengangkutan dan komunikasi,
8. Keuangan, persewaan dan jasa perusahaan,
9. Jasa-jasa.

Untuk menghitung kebutuhan peramalan maka dibutuhkan PDRB yang di ambil dari lapangan usaha yang bersesuaian dengan sektor penggunaan listrik. PDRB yang di gunakan adalah PDRB atas dasar harga konstan, maka untuk menentukan pertumbuhan total PDRB tiap tahunnya adalah sebagai berikut:

$$G_T = \left(\frac{PDRB_t}{PDRB_{t-1}} \right) \times 100\% \quad (19)$$

Dimana:

G_T : Pertumbuhan PDRB pada tahun ke t

$PDRB_t$: PDRB total pada Tahun ke t

PDRB: PDRB total pada tahun ke t-1

2.10.3 Elastisitas

Apabila suatu fungsi dinyatakan sebagai (Sumartono, 2014):

$$Y = f(x) \quad (20)$$

Maka yang dimaksud dengan elastisitas y terhadap x adalah angka yang menunjukkan berapa besar perubahan y akibat terjadinya perubahan suatu unit x atau dapat ditulis dengan fungsi sebagai berikut:

$$\epsilon_{yx} = \frac{\frac{\Delta y}{y} (\text{rata-rata})}{\frac{\Delta x}{x} (\text{rata-rata})} \quad (21)$$

Dalam membuat peramalan kebutuhan energi listrik kita dapat menghitung elastisitas dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$y = a \cdot x^b \quad (22)$$

Dimana:

y = Variabel tak bebas

x = variable bebas

a dan b = konstanta

elastisitas y terhadap x dari persamaan di atas dapat dinyatakan dengan

$$\epsilon_{yx} = \frac{b \cdot a \cdot x^{b-1} \cdot x}{a \cdot x^b}, \text{ atau } \epsilon_{yx} = b \quad (23)$$

Nilai b diperoleh dari regresi sederhana.

2.10.4 Pertumbuhan Pelanggan

Secara sistematis untuk menentukan peramalan jumlah pelanggan rumah tangga, dirumuskan sebagai berikut :

$$Pelanggan_{R_t} = Pelanggan_{R_{t-1}} x \left(1 + \left(\frac{e \cdot Pelanggan_{R_x G_T}}{100} \right) \right) \quad (24)$$

Dimana:

$Pelanggan_{R_t}$ = Pelanggan rumah tangga tahun ke t

$Pelanggan_{R_{t-1}}$ = Pelanggan rumah tangga tahun ke t-1

$e Pelanggan_R$ = Elastisitas Pelanggan Rumah tangga

G_T = Pertumbuhan PDRB

Peramalan daya tersambung rumah tangga dihitung dengan meramalkan daya tersambung per pelanggan rumah tangga baru. Kemudian dengan mengalikannya dengan penambahan pelanggan akan diperoleh jumlah daya tersambung tambahan

Secara matematis untuk menentukan daya tersebut pada rumah tangga dirumuskan:

$$VA_{R_t} = VA_{R_{t-1}} + (\Delta Pelanggan_{R_t} \times S_{R_t}) \quad (25)$$

Dimana

VA_{R_t} = Daya tersambung rumah tangga tahun ke t

$VA_{R_{t-1}}$ = Daya tersambung rumah tangga tahun ke t-1

S_{R_t} = Daya tersambung per pelanggan rumah tangga baru tahun ke t

$\Delta Pelanggan_{R_t}$ = Pertambahan pelanggan rumah tangga tahun ke t