

**PERENCANAAN *BUSBAR* PADA LATAR HUBUNG 150 kV DI
PLTA BALIEM**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

ABDUL AZIS

NIM. 105060300111023 - 63

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

MALANG

2015

LEMBAR PERSETUJUAN

PERENCANAAN *BUSBAR* PADA LATAR HUBUNG 150 kV DI PLTA BALIEM

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

ABDUL AZIS

NIM. 105060300111023 – 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.

NIP. 19600701 199002 1 001

Ir. Hery Purnomo, M.T.

NIP. 19550708 198212 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

PERENCANAAN *BUSBAR* PADA LATAR HUBUNG 150 kV DI PLTA BALIEM

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

ABDUL AZIS

NIM. 105060300111023 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 20 Agustus 2015

Dosen Penguji

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

NIP. 19630106 198802 1 001

Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19730520 200801 1 013

Ir. Teguh Utomo, M.T.

NIP. 19650913 199103 1 003

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19741203 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Perencanaan *Busbar* pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung sebagai berikut.

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Bapak Ir. Hery Purnomo, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dan mengarahkan dalam pengerjaan skripsi ini.
4. Bapak Dwi Fadilla Kurniawan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik beserta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang selalu membantu penulis selama perkuliahan.
5. Keluarga tercinta, Ayah Matruki Ismail, Ibu Rosnalizar, Uni Metra Evita, Kakak Samsul Anwar, dan Adik Aris Juflizal yang selalu mendukung penulis.
6. Keluarga Bapak Matsari, Ibu Ninih, Mas Hamid, dan Mas Anto yang telah menampung dan menjadi keluarga selama perkuliahan.
7. Fajar Hani Priandhika yang selalu membuat kehidupan penuh lika-liku dan Nindya Adiasti yang selalu memberi sudut pandang lain.
8. Erny Anugrahany yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran, dan hati dalam pengerjaan skripsi ini.
9. Luthfan Agam Kevin Fery Dheo Nandha Imam Wahyu Nana Dwika Safti Wildan Rizqi Rize Indri Mas Rotby dan Mas Harmawan yang menjadi sahabat diskusi dalam pengerjaan skripsi ini.
10. Iqbal Mega Anastasia Riza Dian Frengky Tofan Inggil Aldy yang saling mendukung dalam pengerjaan skripsi dan menemani bersenda gurau.
11. Wahyu Abu Fitra Agwin Reza Nizar Angga Aviq Zainma Izul Yudi Dadar yang selalu menemani meluangkan waktu yang seharusnya tidak luang.

12. Maman Laksana Ari Yoga Yatma Arez Radek Gosi Azwar Bagus Fuad Wawan Afnan Dimas Fajar Mu'ammara Sesa Basori Alvin yang selalu menemani dengan canda tawa.
13. Enov Topher Ario Davin yang selalu menjadi sahabat sejak pertama perkuliahan, diharapkan segera mendapatkan gelar Sarjana Teknik. Zara Neta Rara Atika Ayu Resi yang membuat kehidupan lebih berwarna.
14. Keluarga Besar Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya, khususnya keluarga besar Magnet'10 yang telah menjadi keluarga selama perkuliahan.
15. Eleven Rendezvous seluruh Indonesia, khususnya Evouz Malang yang selalu menemani perjalanan kehidupan.

Sekiranya Allah SWT mencatat amalan ikhlas kami dan semua pihak yang turut membantu sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Disadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan, namun semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.



Malang, Agustus 2015

Penulis



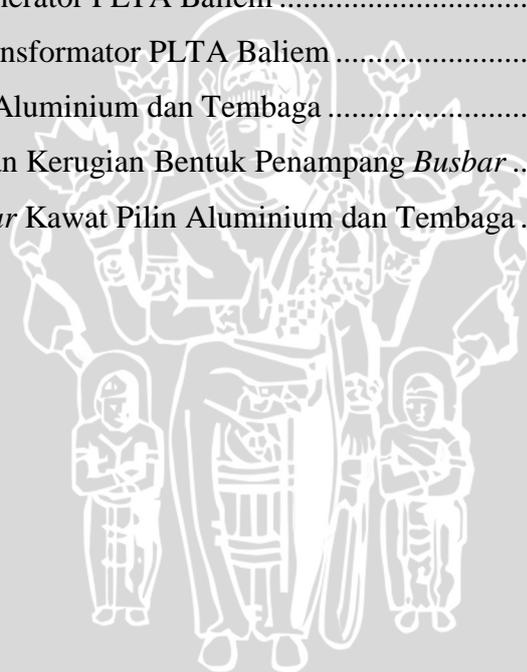
DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
RINGKASAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
1.6 Sistematika Pembahasan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 <i>Busbar</i> pada Gardu Induk.....	4
2.1.1 Jenis Material <i>Busbar</i>	5
2.1.2 Bentuk Penampang <i>Busbar</i>	7
2.1.3 Dimensi <i>Busbar</i>	9
2.2 Konfigurasi <i>Busbar</i>	11
2.3 Parameter Tata Letak <i>Busbar</i>	18
2.3.1 Jarak Aman Minimum Bagian Aktif pada Latar Hubung.....	18
2.3.2 Panjang <i>Busbar</i>	20
2.3.3 Penggambaran Tata Letak <i>Busbar</i>	23
2.4 <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat.....	23
2.4.1 Gaya Tarik <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat.....	24
2.4.2 Gaya Jatuh <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat.....	26
2.4.3 Gaya pada Penyangga saat Hubung Singkat.....	27
2.4.4 Andongan Maksimum <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat.....	27
2.4.5 Ayunan Maksimum <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat.....	28
2.5 Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa.....	29
2.5.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat Tiga Fasa.....	30
2.5.2 Impedansi Urutan Positif Ekuivalen Jaringan.....	30
2.5.3 Impedansi Urutan Positif Generator.....	31
2.5.4 Impedansi Urutan Positif Transformator.....	32
2.5.5 Nilai Dasar.....	32

BAB III METODE PENELITIAN	34
3.1 Studi Literatur	35
3.2 Pengambilan Data	35
3.3 Perhitungan dan Analisis Data	36
3.4 Kesimpulan dan Saran	38
BAB IV PERENCANAAN <i>BUSBAR</i> LATAR HUBUNG 150 kV PLTA BALIEM	39
4.1 PLTA Baliem	39
4.2 Penentuan Jenis Material, Bentuk Penampang, dan Dimensi <i>Busbar</i> pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem	42
4.2.1 Penentuan Jenis Material <i>Busbar</i> pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem	42
4.2.2 Penentuan Bentuk Penampang <i>Busbar</i> pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem	43
4.2.3 Penentuan Dimensi <i>Busbar</i> Kawat Pilin pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem	44
4.3 Penentuan Konfigurasi <i>Busbar</i> pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem	45
4.4 Penghitungan Parameter Tata Letak <i>Busbar</i>	48
4.4.1 Penghitungan Jarak Aman Minimum Bagian Aktif <i>Busbar</i>	48
4.4.2 Penghitungan Panjang <i>Busbar</i>	50
4.5 Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa <i>Busbar</i> pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem	52
4.5.1 Penentuan Nilai Dasar	52
4.5.2 Penghitungan Impedansi Urutan Positif Generator Sinkron	52
4.5.3 Penghitungan Impedansi Urutan Positif Transformator	53
4.5.4 Penghitungan Impedansi Urutan Positif Ekuivalen Jaringan	54
4.5.5 Penghitungan Arus Hubung Singkat Tiga Fasa	55
4.6 <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat	55
4.6.1 Andongan Maksimum <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat	55
4.6.2 Gaya Tarik <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat	57
4.6.3 Gaya Jatuh <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat	61
4.6.4 Gaya pada Penyangga saat Hubung Singkat	61
4.6.5 Ayunan Maksimum <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat	62
4.7 Penggambaran Tata Letak <i>Busbar</i> Latar Hubung 150 kV PLTA Baliem	65
BAB V PENUTUP	66
5.1 Kesimpulan	66
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai-Nilai Khas untuk Sifat Fisik Material Konduktor	6
Tabel 2.2	Perbandingan Sifat Paling Penting dari Bahan Konduktor.....	7
Tabel 2.3	Dimensi <i>Busbar</i> Kawat Pilin Aluminium dan Tembaga	10
Tabel 2.4	Keuntungan dan Kerugian Jenis Konfigurasi <i>Busbar</i>	16
Tabel 2.5	Jarak Aman pada <i>Busbar</i> untuk Instalasi Latar Hubung Luar Ruangan	18
Tabel 2.6	Jumlah Isolator Rantai untuk Instalasi Latar Hubung Luar Ruangan.....	22
Tabel 2.7	Jarak Aman Dinding Perlindungan Kebakaran	22
Tabel 2.8	Reaktansi Urutan Mesin Sinkron.....	31
Tabel 2.9	Jatuh Tegangan Impedansi Transformator	32
Tabel 2.10	Jatuh Tegangan Ohmik Transformator.....	32
Tabel 4.1	Spesifikasi Generator PLTA Baliem	41
Tabel 4.2	Spesifikasi Transformator PLTA Baliem	41
Tabel 4.3	Perbandingan Aluminium dan Tembaga	42
Tabel 4.4	Keuntungan dan Kerugian Bentuk Penampang <i>Busbar</i>	43
Tabel 4.5	Dimensi <i>Busbar</i> Kawat Pilin Aluminium dan Tembaga.....	44



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tiga Komponen Utama dalam Penyaluran Tenaga Listrik.....	4
Gambar 2.2 Beberapa Macam Bentuk Penampang Konduktor Padat	8
Gambar 2.3 Penampang Konduktor Berbentuk Kawat Pilin	8
Gambar 2.4 Konfigurasi Bus Tunggal	11
Gambar 2.5 Konfigurasi Satu Setengah Pemutus Daya	12
Gambar 2.6 Konfigurasi Bus Utama dan Transfer	13
Gambar 2.7 Konfigurasi Bus Cincin.....	14
Gambar 2.8 Konfigurasi Dua Bus-Satu Pemutus Daya.....	15
Gambar 2.9 Konfigurasi Dua Bus-Dua Pemutus Daya	16
Gambar 2.10 Ketinggian Pemasangan Peralatan-Peralatan pada Latar Hubung.....	19
Gambar 2.11 Pembatas dan Ketinggian pada Instalasi.....	19
Gambar 2.12 Jarak Aman Minimum Transportasi Latar Hubung Luar Ruangan	20
Gambar 2.13 Berbagai Panjang pada <i>Busbar</i>	20
Gambar 2.14 Andongan konduktor hingga 150 m pada suhu konduktor +80 °C	21
Gambar 2.15 Tinggi Rantai Isolator h	22
Gambar 2.16 Jarak Aman Dinding Perlindungan Kebakaran pada Transformator	23
Gambar 2.17 Tata Letak <i>Busbar</i> pada Latar Hubung dengan Dua <i>Busbar</i>	23
Gambar 2.18 Faktor Reaksi Rentang ψ Terhasap Tekanan ζ dan Beban ϕ	25
Gambar 2.19 Sudut Maksimum Ayunan δm	27
Gambar 2.20 Ketinggian Minimum Pemasangan <i>Busbar</i>	28
Gambar 2.21 Jarak Aman Minimum Pemasangan Fasa ke Fasa <i>Busbar</i>	28
Gambar 2.22 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian.....	34
Gambar 4.1 Lokasi PLTA Baliem	40
Gambar 4.2 Diagram Satu Garis Sistem Pembangkit PLTA Baliem	41
Gambar 4.3 Dimensi <i>Busbar</i> Kawat Pilin	44
Gambar 4.4 Konfigurasi <i>Busbar</i> Dua Bus-Satu Pemutus Daya	48
Gambar 4.5 Pembatas dan Ketinggian pada Instalasi.....	49
Gambar 4.6 Ketinggian Peralatan-Peralatan Latar Hubung 150 kV PLTA Baliem.....	49
Gambar 4.7 Jarak Aman Minimum Transportasi Latar Hubung Luar Ruangan	50
Gambar 4.8 Jarak Aman Fasa ke Fasa Latar Hubung 150 kV PLTA Baliem	50
Gambar 4.9 Jarak Aman Antar Saluran Latar Hubung 150 kV.....	51

Gambar 4.10 Berbagai Panjang pada *Busbar* 52

Gambar 4.11 Rangkaian Impedansi Urutan Positif Total..... 54

Gambar 4.14 Jarak Aman Minimum Pemasangan Antar Fasa *Busbar* 65

Gambar 4.15 Jarak Aman Minimum Pemasangan Antar Fasa *Busbar* 65



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rekapitulasi Penghitungan Perencanaan <i>Busbar</i>	68
Lampiran 2 Tata Letak <i>Busbar</i> Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem	70



RINGKASAN

Abdul Azis, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2015, *Perencanaan Busbar pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem*, Dosen Pembimbing: Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Ir. Hery Purnomo, M.T.

Sesuai program pemerintah, PLN merencanakan membangun PLTA Baliem dan sarana penunjang (jalan hantar dan SUTT 150 kV termasuk gardu induk 150 kV) untuk memenuhi kebutuhan listrik wilayah Kabupaten Jayawijaya dan Yahukimo, serta di wilayah pegunungan tengah Provinsi Papua dengan memanfaatkan potensi sumber daya air Sungai Baliem. Salah satu komponen penting pada latar hubung (gardu induk) adalah *busbar* yang merupakan konduktor penghantar arus listrik yang dapat menyalurkan arus dan tegangan listrik kapasitas besar. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan perencanaan dan tata letak *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem. Dalam merencanakan *busbar* perlu dipilih jenis material, bentuk penampang, jenis konfigurasi, dan dihitung arus nominal dan arus hubung singkat. Setelah itu dihitung dimensi, jarak aman minimum, panjang, gaya dan ayunan saat hubung singkat, dan digambar tata letak *busbar*.

Busbar pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem ditentukan menggunakan aluminium atau tembaga berbentuk kawat pilin, berdimensi 19 pilin dengan pilin berdiameter 2,5 mm untuk aluminium dan 2,1 mm untuk tembaga, dan jenis konfigurasi dua bus-satu pemutus daya. Ketinggian minimum di dalam instalasi 3,94 m dan di luar instalasi 6 m. Jarak aman antar peralatan di dalam instalasi 1,8 m dengan memasang rantai/tali dan di luar instalasi 3 m dengan memasang kawat jaring. Jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan untuk manusia 1,9 m dan transportasi untuk kendaraan 6,6 m. Panjang *busbar* adalah 22,8 m. Ketinggian minimum pemasangan *busbar* 4,32 m untuk aluminium dan 4,35 m untuk tembaga. Gaya tarik *busbar* pada tiang ujung adalah 6459,35 N untuk aluminium dan 6500,1 N untuk tembaga. Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa *busbar* 2,38 m untuk aluminium dan 2,22 m untuk tembaga.

Kata kunci—*Busbar*, latar hubung, 150 kV, PLTA Baliem

SUMMARY

Abdul Azis, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, in July 2015, *Busbar Planning in 150 kV Substation in Baliem Hydropower*, Counselor Lecturer: Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. and Ir. Hery Purnomo, M.T.

According to government program, PLN plans to build Baliem Hydropower and support facilities (roads and 150 kV high voltage transmission line, including 150 kV substation) to supply the electricity demand Jayawijaya and Yahukimo region, as well as in the central mountainous region of Papua Province by exploiting the water resources potential of Baliem River. One important component in the switchyard (substation) is busbar that a conductor of electrical current that can deliver large capacity of electric current and voltage. The purpose of this research is to get the planning and the layout of the busbar in 150 kV substation in Baliem Hydropower. In planning the busbar, the type of material, cross-sectional shape, and configuration types need to be chosen, and the nominal and short circuit current need to be calculated. After that, dimensions, the minimum clearance, length, and short circuit force and swing need to be calculated, and the layout of the busbars need to be drawn.

Busbar in 150 kV substation in Baliem Hydropower is determined using stranded wire of aluminium or copper material, the dimension is 19 stranded wires with 2,5 mm diameter each wire for aluminum and 2,1 mm diameter each wire for copper, and the type of configuration is double busbar-single circuit breaker. The minimum height of installation is 3,94 m inside and 6 m outside. Clearance between devices of installation is 1,8 m inside by installing a chain/rope and 3 m outside by installing wire mesh. The minimum maintenance walking access clearance for humans is 1,9 m and the minimum transportation clearance for vehicles is 6,6 m. Busbar length is 22.8 m. The minimum height of busbar installation is 4,32 m for aluminum and 4,35 m for copper. Tensile force of busbar on the tip support is 6459,35 N for aluminum and 6500,1 N for copper. The minimum fase to fase clearance of busbar installation is 2,38 m for aluminum and 2,22 m for copper.

Keywords—Busbar, substation, 150 kV, Baliem Hydropower

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sesuai dengan program pemerintah melalui PLN bahwa PLN merencanakan membangun PLTA Baliem dan Sarana Penunjang (Jalan Hantar dan SUTT 150 kV termasuk Gardu Induk 150 kV) dengan tujuan untuk memenuhi kebutuhan listrik Provinsi Papua dengan memanfaatkan energi terbarukan dari potensi sumber daya air Sungai Baliem. Selanjutnya energi listrik yang dihasilkan didistribusikan ke distrik-distrik yang ada di wilayah Kabupaten Jayawijaya dan Yahukimo, serta di wilayah pegunungan tengah Provinsi Papua (R-AMDAL).

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu pusat pembangkit listrik (dalam hal ini PLTA Baliem), saluran transmisi, dan sistem distribusi. Saluran transmisi merupakan rantai penghubung antara pusat pembangkit listrik dan sistem distribusi. Untuk menghubungkan pusat pembangkit listrik dan saluran transmisi dibutuhkan sebuah gardu induk (Stevenson, 1996:1). Sejah struktur yang bersangkutan, istilah gardu induk (*substation*) dan latar hubung (*switchyard*) dapat digunakan secara bergantian (ASCE Subcommittee, 2008:6).

Latar hubung merupakan kumpulan sakelar, pemutus daya, bus, dan peralatan bantu yang digunakan untuk mengumpulkan listrik dari generator listrik dan mendistribusikannya ke saluran transmisi. Bagian-bagiannya adalah penangkap petir, transformator tegangan, transformator arus, sakelar pemisah, pemutus daya, rel (*busbar*), sakelar pentanahan, dan panel kontrol lokal. Latar hubung dapat mencakup transformator daya penaik atau penurun tegangan (ASCE Subcommittee, 2008:6).

Salah satu komponen penting pada latar hubung adalah *busbar* yang merupakan konduktor penghantar arus listrik yang dapat menyalurkan arus dan tegangan listrik kapasitas besar. Dalam merencanakan *busbar* perlu dipilih jenis material, bentuk penampang, jenis konfigurasi, dan dihitung arus nominal dan arus hubung singkat. Setelah itu dihitung dimensi, jarak aman minimum, panjang, gaya dan ayunan saat hubung singkat, dan digambar tata letak *busbar*.

Sistem pembangkit PLTA Baliem direncanakan disuplai oleh sepuluh buah generator 5 MW 11 kV dan dihubungkan ke lima buah transformator penaik tegangan 13 MVA 11 kV/150 kV, di mana setiap 2 generator dihubungkan pada sebuah transformator. Lima buah transformator ini kemudian dihubungkan ke sebuah *busbar*

(Studi Kelayakan PLTA Baliem, 2014). Daya yang akan dibangkitkan PLTA Baliem hanya sebesar 50 MW namun membutuhkan sepuluh buah generator dan lima buah transformator penaik tegangan yang terhubung ke *busbar*. Hal ini menyebabkan dimensi *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem berbeda dengan *busbar* pada umumnya dengan daya yang setara.

Atas dasar latar belakang tersebut, maka di dalam penelitian ini akan dibahas mengenai perencanaan *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem yang memenuhi standar keselamatan dan keamanan yang disesuaikan dengan kapasitas pembangkit listrik di PLTA Baliem.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah yang disusun adalah sebagai berikut.

- a. Bagaimana perencanaan *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem.
- b. Bagaimana tata letak *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem.

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah tersebut di atas, batasan masalah yang dirumuskan adalah sebagai berikut.

- a. Perencanaan *busbar* dilakukan pada latar hubung 150 kV pada gardu induk yang tersambung langsung dengan pembangkit, yaitu PLTA Baliem.
- b. Perencanaan *busbar* disesuaikan dengan pembangkit listrik di PLTA Baliem.
- c. Perencanaan *busbar* meliputi jenis material, bentuk penampang, dimensi, jenis konfigurasi, jarak aman minimum, panjang, dan gaya dan ayunan *busbar* saat hubung singkat.
- d. Tata letak *busbar* meliputi penggambaran tata letak *busbar* berdasarkan jarak aman minimum, panjang, dan ayunan *busbar* saat hubung singkat.
- e. Hanya membahas faktor teknis dan mekanis dari perencanaan *busbar*.

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan perencanaan dan tata letak *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Dapat dijadikan referensi dalam perencanaan *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem.
- b. Dapat dijadikan referensi dalam perencanaan *busbar* pada latar hubung pada pembangkit listrik yang lain.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika pembahasan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori dan digunakan sebagai dasar penelitian yang berkaitan dengan permasalahan yang diajukan dalam penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Berisi metode yang digunakan dalam penelitian ini yang terdiri dari studi literatur, pengambilan data, perhitungan dan analisis data, serta kesimpulan dan saran.

BAB IV PERENCANAAN *BUSBAR* PADA LATAR HUBUNG 150 kV DI PLTA BALIEM

Berisi analisis dan penghitungan tentang perencanaan *busbar* pada latar hubung 150 kV PLTA di Baliem.

BAB V PENUTUP

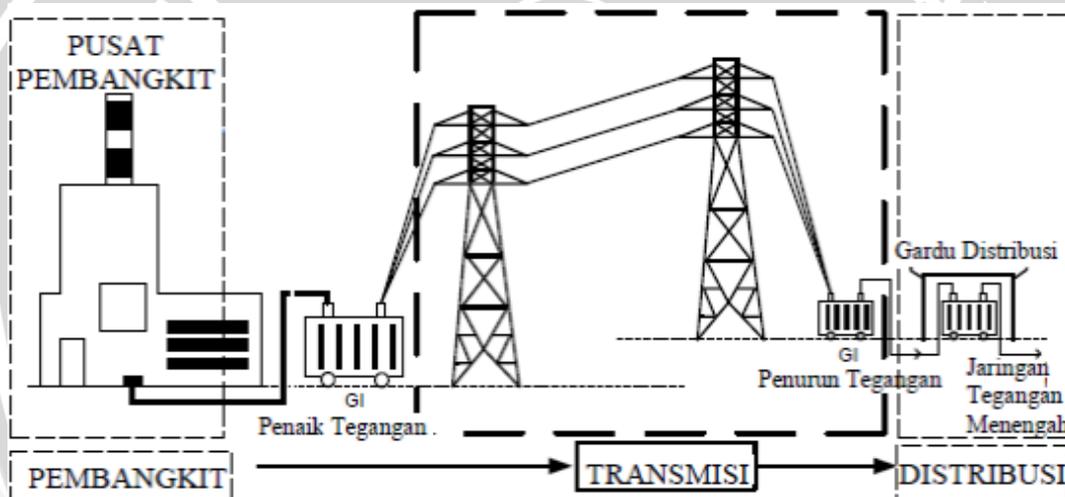
Berisi kesimpulan hasil penelitian dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya di masa yang akan datang.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Busbar pada Gardu Induk

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.1 yang terdiri dari beberapa komponen dan peralatan yang saling berhubungan sebagai berikut (Hidayatulloh, 2012).

1. Sistem pembangkit yang meliputi generator listrik dan gardu induk pembangkit.
2. Sistem transmisi yang meliputi jaringan transmisi, gardu induk, dan jaringan sub-transmisi.
3. Sistem distribusi dan beban yang meliputi gardu induk distribusi, jaringan distribusi primer, gardu distribusi, jaringan distribusi sekunder, dan beban listrik atau pelanggan.



Gambar 2.1 Tiga Komponen Utama dalam Penyaluran Tenaga Listrik
 Sumber: <http://lutro.blogspot.com/2012/12/pengertian-transmisi-dan-distribusi.html>

Sebuah gardu induk merupakan titik sambungan listrik di mana saluran transmisi, transformator, unit pembangkit, sistem pemantauan, dan peralatan kontrol terhubung bersama-sama untuk mengendalikan aliran daya listrik. Di gardu induk tegangan berubah dari satu tingkat ke tingkat yang lain. Semua gardu terdiri dari sejumlah sirkuit masuk dan keluar. Sirkuit masuk dan keluar terhubung ke sistem busbar umum dan dilengkapi dengan peralatan untuk mengalihkan arus listrik, melakukan pengukuran, dan melindungi terhadap petir. Setiap rangkaian listrik dapat dibagi menjadi sirkuit primer dan sirkuit sekunder. Sirkuit primer meliputi saluran transmisi, transformator daya, busbar, dan sisi tegangan tinggi dari transformator arus dan tegangan. Sirkuit sekunder terdiri dari sirkuit pengukuran pada sisi tegangan rendah

dari transformator arus dan tegangan, sirkuit kontrol untuk pemutus daya dan isolator, dan proteksi sirkuit (Machowski, 2008:35).

Busbar atau rel merupakan titik kontak listrik untuk saluran dan transformator (Machowski, 2008:35). *Busbar* dalam sistem tenaga listrik adalah lokasi di mana sumber pembangkit, jalur transmisi, dan beban distribusi bertemu. Pada *busbar* terjadi pertemuan atau hubungan trafo-trafo daya, SUTT, dan peralatan listrik lainnya untuk menerima dan menyalurkan daya listrik. *Busbar* merupakan komponen penghantar arus listrik yang berupa konduktor yang terbuat dari tembaga atau aluminium dan dapat menyalurkan arus dan tegangan listrik kapasitas besar. *Busbar* ada yang telanjang dan ada yang berisolasi tergantung pada kebutuhan dan permintaan. Semua generator sinkron pada pusat pembangkit listrik menyalurkan daya listrik ke *busbar*. Demikian pula semua saluran yang mengambil maupun yang mengirim daya listrik dihubungkan ke *busbar* ini.

2.1.1 Jenis Material *Busbar*

Pada gardu dalam ruangan *busbar* adalah konduktor datar yang terbuat dari aluminium atau tembaga dan ditopang oleh isolator. Sedangkan pada gardu luar ruangan *busbar* adalah kawat pilin yang terbuat dari baja dan aluminium dan digantung pada isolator (Machowski, 2008:35). *Busbar* untuk instalasi latar hubung terbuat dari tembaga (E-Cu) atau aluminium (E-Al). Aluminium campuran dengan sifat listrik dan mekanik yang baik juga digunakan (ABB, 2001:587). *Busbar* utama harus terbuat dari tembaga bermutu tinggi. Aluminium tidak dianjurkan karena masalah mekanis yang terkait dengan sifat lunak dari logam, yang membuat hubungan fisik dan koneksi perangkat tambahan sulit (Sheldrake, 2003:144).

Karakteristik utama aluminium adalah ringan, memiliki konduktivitas panas dan listrik yang tinggi, memiliki ketahanan korosi yang baik dalam atmosfer biasa, serta memiliki keuletan yang cukup tinggi. Aluminium dapat dengan mudah dikombinasikan dengan unsur lain (*alloying*) untuk mengatur karakteristik, seperti sifat mekanis, ketahanan korosi, dan konduktivitas panas dan listrik. Salah satu kelemahan utama aluminium adalah titik leburnya yang relatif rendah, yaitu hanya 660 °C (Sofyan, 2011).

Keuntungan dari aluminium adalah busur hubung singkat hanya memberikan kenaikan untuk non-konduktor, residu debu seperti aluminium oksida. Tidak ada logam yang diendapkan pada isolator atau komponen lain dari instalasi, sehingga membatasi tingkat kerusakan. Oleh karena itu instalasi *switchgear* dengan *busbar* aluminium dapat dengan cepat terhubung kembali setelah busur hubung singkat (ABB, 2001:587).

Tembaga berbeda dengan logam-logam yang lainnya, terutama dalam hal konduktivitas listrik. Dalam tingkatan volume yang sama, tembaga memiliki konduktivitas listrik paling tinggi jika dibandingkan dengan logam lain, kecuali perak murni. Selain itu tembaga juga memiliki sifat yang baik dalam hal konduktivitas panas, ketahanan korosi, pengubahan bentuk, dan penyambungan. Namun demikian, di sisi lain tembaga dan paduannya adalah logam yang memiliki kekuatan rendah. Beberapa paduan tembaga juga rentan terhadap korosi retak tegang, kecuali jika perlakuan lepas tegang. Titik lebur tembaga adalah 1.085 °C. Logam ini memiliki struktur kristal FCC, dan sama sekali tidak tertarik oleh magnet (bersifat diamagnetik). Tembaga memiliki keuletan dan kelunakan yang tinggi (Sofyan, 2011).

Nilai-nilai khas beberapa material yang digunakan dalam perhitungan mengenai pembangunan instalasi *switchgear* seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.1 dan perbandingan sifat fisik konduktor yang umum digunakan seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.2 berikut. (ABB, 2001:587).

Tabel 2.1 Nilai-Nilai Khas untuk Sifat Fisik Material Konduktor

Material	Simbol	Gaya regang R_m minimum (N/mm ²)	Modulus Young (N/mm ²)	Gaya yang dihasilkan		Kekerasan Brinell HB 10 (N/mm ²)	Konduktivitas K pada 20 °C minimal (m/Ωmm ²)
				R_{p02} minimum (N/mm ²)	R'_{p02} maksimum (N/mm ²)		
Tembaga	E-Cu F 20	200	11x10 ⁴	-	120	450- 700	57,0
	E-Cu F 25	250	11x10 ⁴	200	290	700- 950	56,0
	E-Cu F 30	300	11x10 ⁴	250	360	800-1050	56,0
	E-Cu F 37	370	11x10 ⁴	330	400	950-1150	55,0
Aluminium	E-Al F 6.5/7	65/70	6,5x10 ⁴	25	80	200- 300	35,4
	E-Al F 8	80	6,5x10 ⁴	50	100	220- 320	35,2
	E-Al F 10	100	6,5x10 ⁴	70	120	280- 380	34,8
	E-Al F 13	130	6,5x10 ⁴	90	160	320- 420	34,5
	Al F 10	100	≈6,5x10 ⁴	70		280- 300	34,0
Logam campuran aluminium lentur	E-Al Mg SI 0.5 F 17	170	7x10 ⁴	120	180	450- 650	32,0
	E-Al Mg SI 0.5 F 22	220	7x10 ⁴	160	240	650- 900	30,0
Aluminium berhias tembaga	Cu comprises 15%	130	8x10 ⁴	100	130	-	42,3

Sumber: ABB, 2001:587

Tabel 2.2 Perbandingan Sifat Paling Penting dari Bahan Konduktor yang Umum

Sifat	Satuan	Tembaga (E-Cu)	Aluminium murni (E-Al)	Pantal (E-AlMg Si 0,5)	Tembaga kuning (Ms 58)	Baja (terlapis seng)
Kerapatan	kg/dm ³	8,9	2,7	2,7	8,5	7,85
Konduktivitas elektrik pada 20 °C	m/Ωmm ²	56	35	30	≈18	≈7
Konduktivitas elektrik pada 60 °C	m/Ωmm ²	48	30	26	≈16	≈6
Konduktivitas/kerapatan		6,3	13	11	≈2	≈1
Resistansi tertentu pada 20 °C	Ωmm ² /m	0,0178	0,0286	0,0333	≈0,0555	≈0,143
Koefisien suhu resistansi elektrik antara 1-100 °C	K ⁻¹	0,0038	0,004	0,0036	0,0024	0,005
Titik lebur	°C	1083	658	630	≈912	1400
Kepanasan lebur	Ws/g	181,28	386,86	376,81	167,47	293,07
	Ws/cm ³	1612	1047	1017	1444	2302
Kepanasan khusus tertentu antara 1-100 °C	Ws/g·K	0,393	0,92	0,92	0,397	0,485
	Ws/cm ³ ·K	3,475	2,386	2,386	3,391	3,558
Konduktivitas termal antara 1-100 °C	Ws/cm·s·K	3,85	2,2	1,9	1,1	0,46
Koefisien perluasan tertentu antara 1-100 °C	mm ² /m·K	0,017	0,024	0,023	0,018	0,012
Modulus Young	N/mm ³	110000	65000	70000	≈90000	210000
Kerapatan batas arus termal	A/mm ³	154	102	89	91	-
Kerapatan arus pelelehan	A/mm ³	3060	1910	1690	1900	-

Sumber: ABB, 2001:588

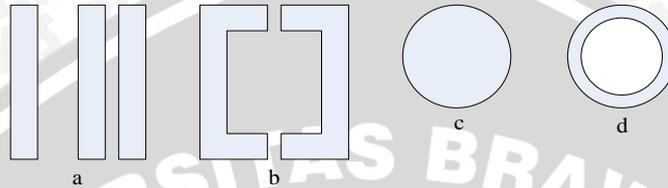
Kerapatan arus batas termal adalah kerapatan arus saat suhu konduktor naik dari 35°C sampai 200°C ketika dibebani selama 1s. Pembuangan panas konduktif diabaikan. Kerapatan arus pelelehan adalah kerapatan arus di mana suhu konduktor naik ke suhu leleh saat dibebani selama 0,01s. Nilai menurut Müller-Hillebrand (ABB, 2001:588).

2.1.2 Bentuk Penampang Busbar

Untuk memilih bentuk penampang konduktor harus diketahui fungsi konduktor tersebut secara elektrik, iklim, faktor operasional yang mempengaruhi keandalan sistem, waktu hidup yang diharapkan dari peralatan, kebutuhan fleksibilitas dalam pengerjaan dan operasional konduktor, kondisi yang ditetapkan untuk pembuangan panas konduktor, dan tekanan kritis di sepanjang penjaluran yang dapat membahayakan seluruh sambungan (ABB, 2001:645). Ada beberapa macam bentuk penampang konduktor padat yang bisa digunakan sebagai busbar yaitu persegi panjang, bulat, cincin, dan U. Selain itu ada juga penampang konduktor berbentuk kawat pilin.

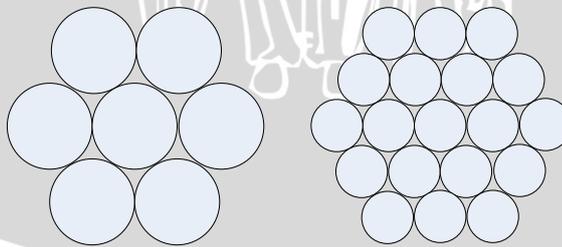
Konduktor padat merupakan konduktor tunggal yang hanya terdiri dari satu untai logam. Konduktor padat tangguh secara mekanis dan biaya produksinya lebih

murah daripada kawat pilin. Kerugian utama dari konduktor padat adalah kurangnya fleksibilitas sehingga konduktor padat hanya digunakan bila fleksibilitas konduktor yang dibutuhkan sedikit. Konduktor padat juga tidak begitu tahan terhadap getaran dan gerakan berulang yang mungkin terjadi sehingga lebih mudah rusak daripada kawat pilin. Hal ini menyebabkan konduktor padat lebih cocok digunakan untuk aplikasi yang benar-benar statis. Beberapa macam bentuk penampang konduktor padat seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Beberapa Macam Bentuk Penampang Konduktor Padat
a. persegi panjang b. U c. bulat d. cincin

Kawat pilin terdiri dari beberapa pilin logam yang lebih kecil yang dikumpulkan dan dipelintir bersama untuk membentuk sebuah konduktor yang lebih besar pada sejumlah konfigurasi tertentu. Keuntungan terbesar dari kawat pilin adalah jauh lebih fleksibel daripada konduktor padat untuk total luas penampang yang sama dan menawarkan daya tahan lebih untuk pengaplikasiannya. Fleksibilitas mekanik kawat pilin mampu menahan pembengkokan dan pembelitan ulang yang jauh lebih baik daripada konduktor padat yang cenderung retak setelah beberapa waktu karena biasanya bila ada sedikit getaran atau gerakan kawat dapat menyebabkan kerusakan pada konduktor padat. Penampang konduktor berbentuk kawat pilin seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Penampang Konduktor Berbentuk Kawat Pilin Susunan 7 dan 19 Kawat

Semakin banyak jumlah pilinannya maka kawat pilin semakin fleksibel. Selain itu untuk ukuran konduktor yang lebih besar, kawat pilin memberikan kemudahan instalasi dan penjaluran karena kawat pilin lebih lentur. Meskipun kawat pilin memerlukan biaya yang lebih banyak namun perlu dipertimbangkan bahwa konduktor harus mampu menahan segala jenis gerakan atau regangan.

Untuk konduktor padat yang berbentuk persegi panjang dan kawat pilin dengan total luas penampang yang sama, diameter keseluruhan kawat pilin akan terlihat lebih besar karena karena terdapat celah udara di antara pilin. Untuk mengatasi adanya celah udara pada kawat pilin, beberapa jenis kawat pilin dipampatkan terlebih dahulu. Kawat ini dibentuk dalam keadaan dingin untuk mengurangi diameter pilinan kawat dan memaksa keluar semua celah udara dengan tetap menjaga agar pilinannya terpisah yang memungkinkan fleksibilitasnya akan tetap terjaga. Hal ini sering dilakukan jika ruang terbatas atau kawat pilin sebagai kawat telanjang di udara untuk mengurangi hambatan angin.

Meskipun diameter keseluruhan kawat pilin terlihat lebih besar daripada konduktor padat, namun konduktor padat dan kawat pilin memiliki total luas penampang yang sama persis sebagai material konduktif. Ini berarti kemampuan hantar arusnya juga sama. Demikian pula, tidak akan ada perbedaan jatuh tegangan bila menggunakan konduktor padat atau kawat pilin yang kemampuan hantar arusnya adalah sama.

Kawat pilin digunakan ketika diperlukan resistansi yang lebih tinggi untuk logam. Kawat pilin memiliki resistansi yang lebih tinggi dari konduktor padat dengan diameter yang sama karena pada kawat pilin terdapat celah yang tidak dapat dihindari antara pilin. Pada frekuensi tinggi, arus mengalir dekat dengan permukaan konduktor karena adanya efek kulit, sehingga terjadi peningkatan rugi daya pada konduktor. Kawat pilin dapat mengurangi efek kulit ini karena total luas permukaan kawat pilin lebih besar daripada luas permukaan konduktor padat yang setara. Tapi biasanya kawat pilin tidak mengurangi efek kulit karena semua pilin terhubung bersama-sama dan berperilaku sebagai konduktor tunggal.

2.1.3 Dimensi Busbar

Dimensi busbar ditentukan berdasarkan arus nominal yang mengalir pada busbar. Berdasarkan PUIL 2000 arus yang mengalir pada busbar tersebut dan harus sesuai dengan standar yang telah ditetapkan sesuai dengan Persamaan 2-1 berikut.

$$KHA = 1,25 \cdot I_{n \text{ 3 fasa}} \quad (2-1)$$

Arus nominal tiga fasa dihitung dengan Persamaan 2-2 sebagai berikut.

$$I_{n \text{ 3 fasa}} = \frac{S_{3 \text{ fasa}}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL}} \quad (2-2)$$

Bila diketahui nilai daya aktif dalam MW dan faktor dayanya, nilai daya semu dapat dihitung dengan Persamaan 2-3 sebagai berikut (Stevenson, 1996:19).

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (2-3)$$

Dimensi busbar kawat pilin berdasarkan arus nominal busbar pada material aluminium dan tembaga seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.3 berikut (ABB, 2001:624).

Tabel 2.3 Dimensi Busbar Kawat Pilin Aluminium dan Tembaga

A' (mm ²)	n	d (mm)	d _{total} (mm)	A (mm ²)	I (A)		m' (kg/m)		E (kN/mm ²)	
					Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu
10	7	1,35	4,1	10,02	-	90	-	0,090	-	113
16	7	1,70	5,1	15,89	110	125	0,043	0,143	67	113
25	7	2,10	6,3	24,25	145	160	0,066	0,218	67	113
35	7	2,50	7,5	34,36	180	200	0,094	0,310	67	113
50	7	3,00	9,0	49,48	225	250	0,135	0,446	67	113
50	19	1,80	9,0	48,35			0,133	0,437	57	105
70	19	2,10	10,5	65,81	270	310	0,181	0,596	57	105
95	19	2,50	12,5	93,27	340	380	0,256	0,845	57	105
120	19	2,80	14,0	116,99	390	440	0,322	1,060	57	105
150	37	2,25	15,8	147,11	455	510	0,406	1,337	57	105
185	37	2,50	17,5	181,62	520	585	0,500	1,649	57	105
240	61	2,25	20,3	242,54	625	700	0,670	2,209	55	100
300	61	2,50	22,5	299,43	710	800	0,827	2,725	55	100
400	61	2,89	26,0	400,14	855	960	1,104	3,640	55	100
500	61	3,23	29,1	499,83	960	1110	1,379	4,545	55	100
625	91	2,96	32,6	626,20	1140	-	1,732	-	55	-
800	91	3,35	36,9	802,09	1340	-	2,218	-	55	-
1000	91	3,74	41,1	999,71	1540	-	2,767	-	55	-

Sumber: ABB, 2001:617

Keterangan Tabel 2.3 sebagai berikut.

A'	: luas penampang nominal	A	: luas penampang sebenarnya
n	: jumlah pilin	I	: arus kontinu
d	: diameter pilin	m'	: berat konduktor
d _{total}	: diameter total	E	: Modulus Young

Nilai pada Tabel 2.3 dengan asumsi sebagai berikut.

- Kecepatan angin 0,6 m/s dan sinar matahari untuk suhu sekitar 35 °C
- Suhu konduktor tembaga 70 °C dan suhu konduktor aluminium 80 °C.

2.2 Konfigurasi Busbar

Konfigurasi busbar yang berbeda mungkin terjadi, seperti perbedaan kemudahan penyesuaian sambungan listrik dan kemudahan pemeliharaan tanpa mengganggu pengoperasian gardu atau sistem keamanan. Konfigurasi busbar ditentukan berdasarkan peran dan pentingnya gardu induk dalam sistem daya, tingkat tegangan, kapasitas terpasang, dan keandalan yang diharapkan dari operasi jaringan. Gardu induk yang lebih besar biasanya menggunakan konfigurasi busbar yang lebih rumit yang membutuhkan investasi modal dan biaya operasi yang lebih tinggi (Machowski, 2008:35).

Konfigurasi busbar untuk instalasi latar hubung tegangan tinggi dan tegangan menengah juga ditentukan berdasarkan pertimbangan operasional, yaitu tergantung pada bagaimana sistem dioperasikan dan pada pembagian sistem untuk menghindari kapasitas yang berlebihan. Konfigurasi busbar juga mempertimbangkan pengembangan gardu induk di masa mendatang (Brand, 2003:47). Parameter tambahan yang harus dipertimbangkan ketika mengevaluasi konfigurasi dari gardu induk atau latar hubung adalah perlindungan rele, biaya, dan juga koneksi saluran untuk fasilitas. Beberapa macam konfigurasi busbar adalah sebagai berikut (Taylor & Francis Group, 2007:3-1).

1. Konfigurasi Bus Tunggal

Konfigurasi bus tunggal merupakan konfigurasi bus paling sederhana yaitu satu bus dan semua koneksi terhubung langsung ke satu bus seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.4. Biayanya rendah, namun keandalan dan kemudahan penyesuaian operasionalnya juga rendah. Kegagalan bus tunggal pada bus utama atau antara bus utama dengan pemutus daya akan menyebabkan gangguan pada seluruh fasilitas meskipun rele proteksinya tepat. Jika ingin melakukan pemeliharaan, perlu memutuskan saluran tempat perangkat yang akan dipelihara tersebut terhubung. Jika tersedia, diperlukan pembangkit siaga atau beban peralihan untuk gardu yang berdekatan untuk meminimalkan pemadaman beban terpasok. Transfer beban dari satu sirkuit ke sirkuit yang lain membutuhkan perangkat pensakelaran tambahan di luar gardu induk.



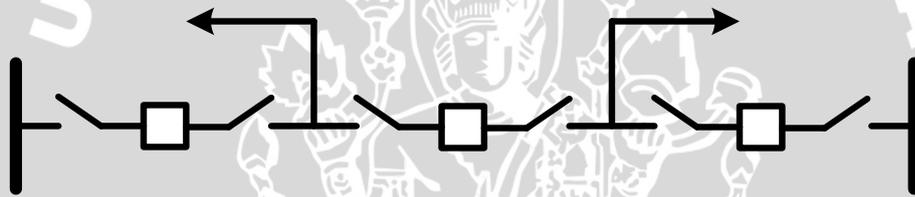
Gambar 2.4 Konfigurasi Bus Tunggal
Sumber: Taylor & Francis Group (2007:3-2)

Konfigurasi bus tunggal harus dibatasi pada fasilitas dengan tingkat beban dan persyaratan ketersediaan rendah. Biasanya konfigurasi bus tunggal hanya tahap awal

dari pengembangan gardu induk. Ketika merencanakan gardu, desainer harus mempertimbangkan konfigurasi akhir dari gardu induk, seperti di mana saluran pasokan di masa depan, transformator, dan bagian bus yang akan ditambahkan. Sesuai dengan meningkatnya beban, keandalan gardu dan kemampuan operasional dapat ditingkatkan dengan langkah penambahan fasilitas (Taylor & Francis Group, 2007:3-1).

2. Konfigurasi Satu Setengah Pemutus Daya

Konfigurasi satu setengah pemutus daya menghubungkan sirkuit antara dua pemutus daya dalam tiga pemutus daya yang terpasang dengan dua bus seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.5. Dengan demikian, satu setengah pemutus daya setiap sirkuit. Konfigurasi ini merupakan tahap pengembangan konfigurasi bus cincin. Keandalan konfigurasi ini baik. Dengan rele proteksi yang tepat, kegagalan sirkuit tunggal tidak mengganggu sirkuit lainnya, dan kegagalan bagian bus, tidak mengganggu sirkuit beban manapun.



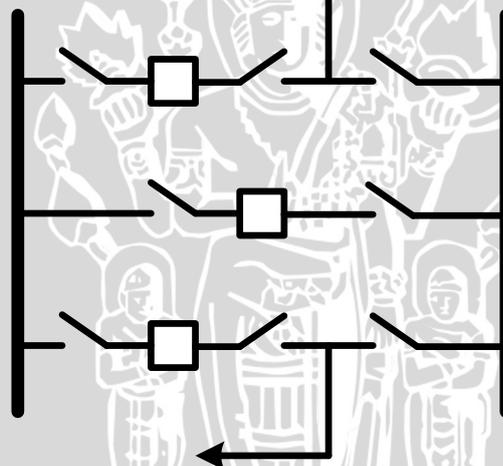
Gambar 2.5 Konfigurasi Satu Setengah Pemutus Daya
Sumber: Taylor & Francis Group (2007:3-5)

Pemeliharaan konfigurasi ini mudah karena seluruh bus dan pemutus daya yang berdekatan dapat dipelihara tanpa mentransfer atau menjatuhkan beban. Rele proteksi mirip dengan bus cincin, dan karena perangkat tambahan, lebih kompleks dan lebih mahal daripada konfigurasi yang lain. Konfigurasi ini dapat diperluas sesuai kebutuhan. Kemudahan penyesuaian operasionalnya baik. Dengan perencanaan rinci dari perluasan gardu induk utama dengan konfigurasi ini, konflik saluran di luar gardu induk dapat diminimalkan. Biaya konfigurasi ini sepadan dengan jumlah sirkuit dan dibutuhkan lahan yang luas sesuai dengan meningkatnya tegangan dan jarak aman yang diperlukan (Taylor & Francis Group, 2007:3-5).

3. Konfigurasi Bus Utama dan Transfer

Konfigurasi bus utama dan transfer menghubungkan semua sirkuit antara bus utama dan bus transfer seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Konfigurasi ini mirip dengan konfigurasi bus tunggal karena selama operasi normal semua sirkuit terhubung ke bus utama. Kegagalan bus utama akan memutuskan semua sirkuit sehingga

keandalan operasinya rendah. Bus transfer digunakan untuk meningkatkan proses pemeliharaan dengan memindahkan saluran pemutus daya untuk diteruskan ke bus transfer. Beberapa sistem yang dioperasikan dengan bus transfer biasanya diputuskan. Ketika perlu dilakukan pemeliharaan, bus transfer diaktifkan melalui pemutus daya seri. Kemudian sakelar yang paling dekat dengan bus transfer, di sirkuit yang akan dipelihara ditutup, lalu pemutus daya serta isolasi terkait sakelar dibuka. Dengan demikian mentransfer saluran pemutus daya yang akan dipelihara ke pemutus daya bus seri dan menghindari gangguan pada sirkuit beban. Kemampuan operasional lain dari konfigurasi ini adalah bahwa bus utama dapat diambil untuk pemeliharaan tanpa pemadaman ke sirkuit dengan memasok dari bus transfer, tapi jelas, rele proteksi (pembalikan otomatis atau sekering) langsung yang berada di luar gardu induk harus dipertimbangkan untuk meminimalkan kesalahan pada salah satu rangkaian saluran dari penyebab pemadaman stasiun yang luas.

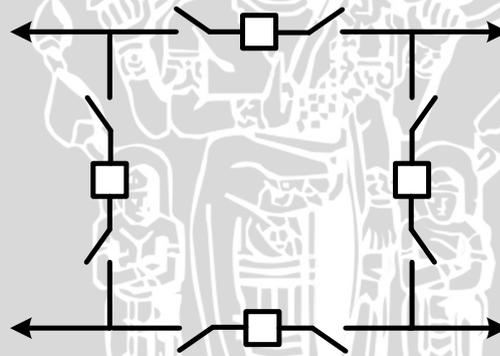


Gambar 2.6 Konfigurasi Bus Utama dan Transfer
Sumber: Taylor & Francis Group (2007:3-3)

Biaya pengaturan konfigurasi ini lebih mahal dari konfigurasi bus tunggal karena diperlukan bus transfer dan perangkat pensakelaran tambahan. Untuk konfigurasi profil rendah dibutuhkan lahan yang lebih luas. Jika saluran biasanya dioperasikan pada atau dekat dengan kemampuannya, beban perlu ditransfer atau generator siaga harus disediakan, mirip dengan cara pemeliharaan konfigurasi bus tunggal. Konfigurasi ini juga merupakan konfigurasi tahap awal. Sesuai dengan meningkatnya beban, pertimbangan pemutus daya bus utama seri harus dilakukan untuk meminimalkan jumlah beban jatuh. Konfigurasi jenis ini harus dibatasi pada kondisi kebutuhan keandalan rendah (Taylor & Francis Group, 2007:3-3).

4. Konfigurasi Bus Cincin

Konfigurasi ini semua pemutus daya diatur dalam sebuah cincin dengan sirkuit terhubung antara dua pemutus daya seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.7. Konfigurasi ini memberikan peningkatan keandalan ke sirkuit, karena dengan rele proteksi operasi yang tepat, kegagalan pada satu bagian bus hanya akan mengganggu sirkuit pada bagian bus itu saja dan kegagalan pada sirkuit tidak akan mempengaruhi perangkat lain. Rele proteksi untuk bus cincin lebih rumit dan berpotensi memerlukan lebih banyak rele untuk melindungi sirkuit tunggal. Bus cincin memberikan kemudahan penyesuaian yang baik. Sebuah pemutus daya dapat dipelihara tanpa mentransfer atau menjatuhkan beban, karena salah satu dari dua pemutus daya dapat tetap bekerja dan memberikan saluran proteksi sementara pemutus daya yang lain sedang dipelihara. Konfigurasi ini juga memberikan operator kemudahan penyesuaian yang baik karena salah satu rangkaian atau bagian bus dapat dipisahkan tanpa mempengaruhi beban pada sirkuit lain. Biaya konfigurasi ini bisa lebih mahal daripada skema bus tunggal, bus utama dan transfer, dan dua bus-satu pemutus daya karena dua pemutus daya diperlukan untuk setiap sirkuit meskipun salah satunya dibagi.



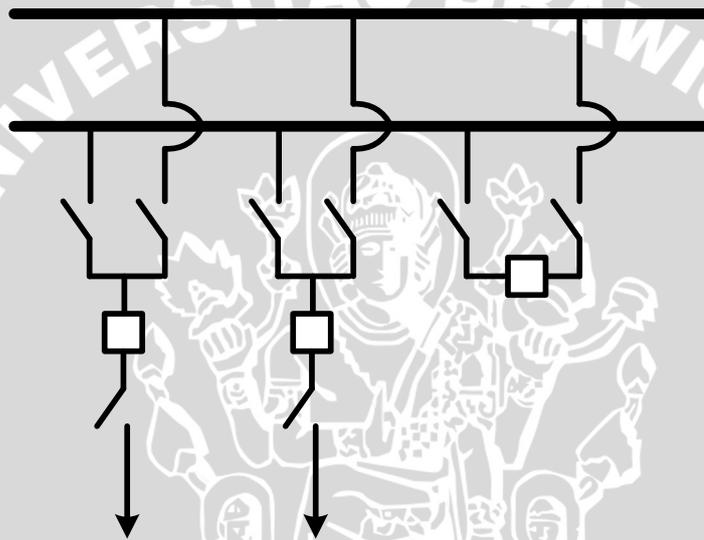
Gambar 2.7 Konfigurasi Bus Cincin
Sumber: Taylor & Francis Group (2007:3-5)

Konfigurasi ini berlaku untuk beban dengan keandalan dan ketersediaan sirkuit merupakan prioritas utama. Kelemahan konfigurasi ini adalah perihal pemutus daya macet yang bisa menyebabkan pemadaman seluruh gardu induk (tergantung pada jumlah pemutus daya di cincin), perluasan yang terbatas karena jumlah sirkuit yang layak secara fisik, serta sirkuit ke bus cincin untuk pemeliharaan dapat menyebabkan kerja bus dan saluran yang luas (Taylor & Francis Group, 2007:3-4).

5. Konfigurasi Dua Bus-Satu Pemutus Daya

Konfigurasi ini menghubungkan setiap sirkuit ke dua bus, dan ada pemutus daya seri antara bus seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.8. Dengan pemutus daya seri

biasanya dioperasikan tertutup, memungkinkan setiap sirkuit dipasok dari bus manapun melalui sakelarnya, sehingga memberikan peningkatan kemudahan penyesuaian operasi dan meningkatkan keandalan. Kegagalan pada satu bus tidak akan mempengaruhi bus lain. Jika pemutus daya bus seri dioperasikan terbuka, maka akan menghilangkan keuntungan sistem dan mengubah konfigurasi ini menjadi konfigurasi bus tunggal. Rele proteksi konfigurasi ini kompleks dengan kemudahan penyesuaian mentransfer setiap sirkuit ke bus manapun. Kegagalan pemutus daya bus seri akan menyebabkan pemadaman seluruh stasiun. Konfigurasi ini memberikan beberapa kemudahan dalam pemeliharaan, terutama untuk pemeliharaan bus. Namun pemeliharaan saluran pemutus daya masih memerlukan sakelar dan pemadaman seperti konfigurasi bus tunggal.

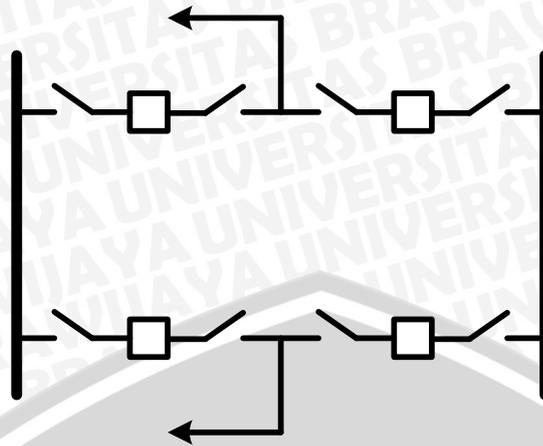


Gambar 2.8 Konfigurasi Dua Bus-Satu Pemutus Daya
Sumber: Taylor & Francis Group (2007:3-4)

Biaya konfigurasi ini lebih mahal dari konfigurasi bus tunggal dengan bus dan perangkat pensakelaran tambahan. Untuk konfigurasi profil rendah dibutuhkan lahan yang lebih luas. Konfigurasi ini paling cocok jika transfer beban dan peningkatan keandalan operasi merupakan hal yang penting (Taylor & Francis Group, 2007:3-4).

6. Konfigurasi Dua Bus-Dua Pemutus Daya

Konfigurasi dua bus-dua pemutus daya melibatkan dua pemutus daya dan dua bus untuk setiap sirkuit seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.9 sehingga kegagalan pada konfigurasi bus tunggal diisolasi tanpa mengganggu sirkuit atau beban. Kegagalan pada satu sirkuit tidak mengganggu sirkuit atau bus lain sehingga keandalannya sangat tinggi. Pemeliharaan perangkat pada konfigurasi ini sangat mudah, karena perangkat dapat diambil untuk dipelihara dan sirkuit terus beroperasi dengan pemutus daya yang lain.



Gambar 2.9 Konfigurasi Dua Bus-Dua Pemutus Daya
 Sumber: Taylor & Francis Group, (2007:3-2)

Konfigurasi ini memerlukan biaya yang lebih mahal dibandingkan konfigurasi bus lain yang lebih sederhana karena memerlukan dua kali perangkat pensakelaran dan bus. Selain itu, diperlukan rele yang lebih rumit dan lahan yang lebih luas. Koneksi saluran eksternal untuk gardu induk dua bus-dua pemutus daya biasanya tidak menyebabkan masalah satu sama lain, tapi mungkin membutuhkan lahan yang cukup luas. Konfigurasi ini memungkinkan kemudahan penyesuaian operasional. Saluran tertentu bisa dipasok dari satu bagian bus dengan mengalihkan perangkat yang ada. Konfigurasi bus ini berlaku untuk beban yang membutuhkan keandalan tingkat tinggi, waktu gangguan minimum, dan dapat diperluas ke berbagai konfigurasi seperti konfigurasi bus cincin atau konfigurasi satu setengah pemutus daya (Taylor & Francis Group, 2007:3-2).

Keuntungan dan kerugian masing-masing konfigurasi busbar seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 Keuntungan dan Kerugian Jenis Konfigurasi Busbar

Konfigurasi busbar	Keuntungan	Kerugian
Satu setengah pemutus daya	<ul style="list-style-type: none"> - Biayanya sedang sesuai dengan keandalan dan fleksibilitas operasi yang tinggi - Keandalan tinggi - Fleksibilitas operasi dan pemeliharaan yang paling bagus - Kesalahan pemutus daya pada sisi busbar memisahkan hanya satu cabang - Setiap bus bisa diisolasi kapan saja - Semua operasi pensakelaran dieksekusi dengan pemutus daya - Pergantian pensakelaran mudah, tanpa menggunakan isolator - Kesalahan busbar tidak menyebabkan pemisahan cabang 	<ul style="list-style-type: none"> - Perlu area yang lebih luas karena komponen tambahan dan kebutuhan area meningkat secara signifikan sesuai level tegangan yang lebih tinggi - Dibutuhkan tiga pemutus daya untuk dua cabang - Biaya yang lebih besar untuk proteksi dan auto-reclosure, seperti pemutus daya tengah harus menanggapi secara mandiri dalam arah kedua sumber

Konfigurasi busbar	Keuntungan	Kerugian
Bus tunggal	<ul style="list-style-type: none"> - Biayanya yang paling rendah karena komponen yang dibutuhkan sedikit - Area yang dibutuhkan paling sempit karena komponen yang dibutuhkan sedikit 	<ul style="list-style-type: none"> - Keandalan paling rendah - Bila busbar mengalami gangguan menyebabkan gangguan seluruh GI - Pemeliharaannya sulit - Fleksibilitas operasi terbatas - Jika ingin memperluas gardu induk harus memutuskan instalasi - Pemeliharaannya hanya bila beban dapat diputus atau dipasok dari tempat lain
Bus utama dan transfer	<ul style="list-style-type: none"> - Biayanya murah - Fleksibilitas operasi dan pemeliharaan lebih baik dari <i>single bus</i> karena ada bus transfer - Setiap pemutus daya dapat diakses untuk pemeliharaan tanpa memutuskan instalasi - Area yang dibutuhkan sempit 	<ul style="list-style-type: none"> - Keandalan rendah - Dibutuhkan peralatan dan material lebih banyak daripada <i>single bus</i> - pemutus daya tambahan untuk menghubungkan melalui <i>bypass</i> - Bila busbar atau pemutus daya yang mana saja mengalami gangguan menyebabkan gangguan seluruh GI
Dua bus-satu pemutus daya	<ul style="list-style-type: none"> - Fleksibilitas pergantian yang tinggi - Masing-masing busbar dapat diisolasi untuk pemeliharaan - Masing-masing cabang dapat dihubungkan ke setiap bus dengan mengikat pemutus daya dan isolator busbar tanpa penghentian 	<ul style="list-style-type: none"> - Biaya mahal karena peralatan ganda dan material tambahan - Keandalan sedang - Perlu area yang lebih luas karena peralatan ganda dan material tambahan - pemutus daya ekstra untuk penghubung - Proteksi busbar memisahkan cabang yang tersambung dengan bus yang rusak - Gangguan di cabang pemutus daya memisahkan semua cabang pada busbar yang terkena - Gangguan pada pemutus daya menyebabkan gangguan seluruh GI
Dua bus-dua pemutus daya	<ul style="list-style-type: none"> - Keandalan tinggi karena peralatan ganda - Setiap cabang memiliki dua pemutus daya - Memungkinkan hubungan untuk busbar yang mana saja - Masing-masing pemutus daya dapat dilayani tanpa memisahkan cabang - Ketersediaan tinggi - Kesalahan rangkaian tunggal atau bus hanya memisahkan komponen tersebut - Fleksibilitas operasi dan pemeliharaan tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> - Metode yang paling mahal karena peralatan ganda dan material tambahan - Perlu area yang lebih luas karena peralatan ganda dan material tambahan - Kerusakan pemutus daya menyebabkan setengah cabang putus jika tidak terhubung dengan kedua busbar - Sirkuit cabang dipertimbangkan dalam sistem proteksi; berlaku juga untuk konsep pemutus daya ganda lainnya
Bus cincin	<ul style="list-style-type: none"> - Biayanya sedang karena perlu peralatan dan material tambahan - Perlu area sedang tergantung luasnya perkembangan gardu induk - Keandalan tinggi - Setiap pemutus daya dapat dipelihara tanpa memisahkan beban - Hanya dibutuhkan satu pemutus daya setiap cabang - Tidak dibutuhkan busbar utama - Setiap cabang terhubung ke jaringan oleh dua pemutus daya - Semua pergantian pensakelaran selesai dengan pemutus daya 	<ul style="list-style-type: none"> - Pemeliharaan pemutus daya dan gangguan apapun akan memutuskan ring - Dibutuhkan gambaran potensial dalam semua cabang - Sempit untuk pergantian pensakelaran

Sumber: ABB, 2001:490 dan Taylor & Francis Group, 2007:3-6

2.3 Parameter Tata Letak Busbar

2.3.1 Jarak Aman Minimum Bagian Aktif pada Latar Hubung

Sesuai DIN VDE 0101, jarak aman minimum bagian aktif pada latar hubung ditentukan untuk melindungi kontak tidak sengaja yang mungkin terjadi ke bagian aktif yang berbahaya, antara lain jarak aman minimum antar bagian aktif, antara bagian aktif dengan bumi, antara bagian aktif dengan manusia, antar peralatan, pemeliharaan, dan transportasi (ABB, 2001:177). Jarak aman minimum antar bagian aktif fasa ke fasa konduktor a dan antara bagian aktif fasa ke bumi N pada latar hubung setidaknya harus sesuai nilai yang ditunjukkan dalam Tabel 2.5 berikut (ABB, 2001:180).

Tabel 2.5 Jarak Aman pada Busbar untuk Instalasi Latar Hubung Luar Ruangan

Tegangan nominal U_n	Tegangan maksimum peralatan U_m	Jarak aman minimum fasa ke fasa a dan fasa ke bumi N
kV	kV	mm
3	3,6	120
6	7,2	120
10	12	150
20	24	220
30	36	320
45	52	480
60	72,5	630
110	123	1100
150	170	1500
220	245	2100
380	420	3400
480	525	4100
700	765	6400

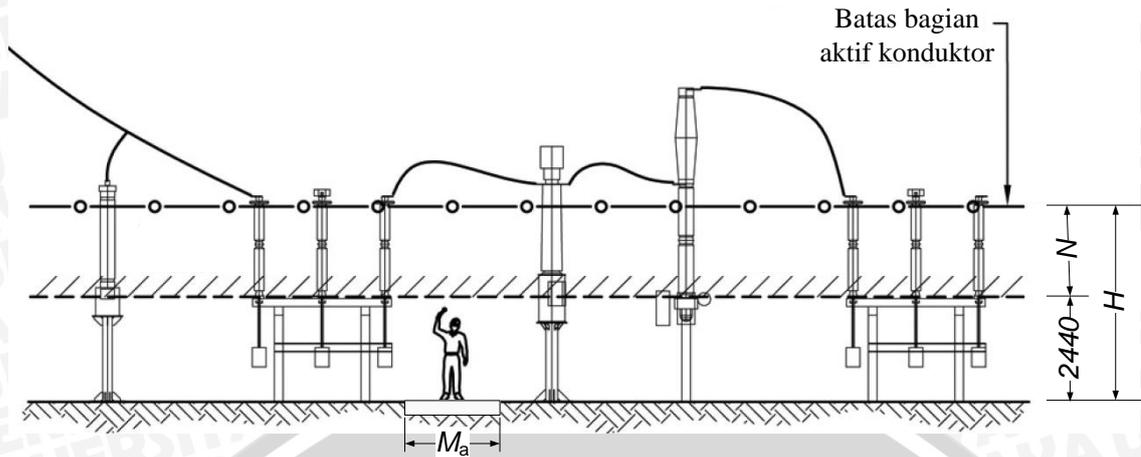
Sumber: ABB, 2001:180

Jarak aman minimum antara bagian aktif dengan bumi adalah daerah berbahaya untuk peralatan-peralatan pada latar hubung yang dipasang pada ketinggian minimal 2440 mm di atas jalan seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.10 (Transpower, 2009:14).

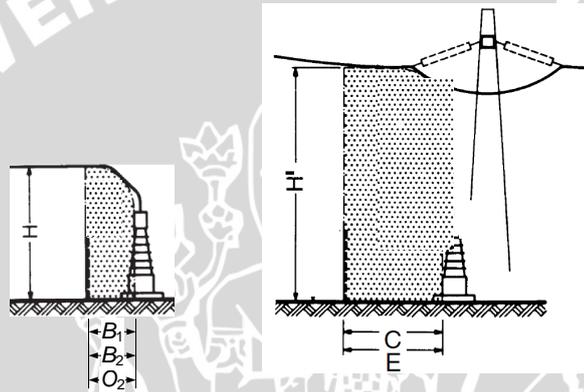
Jarak aman minimum antara bagian aktif dengan manusia adalah ketinggian minimum di dalam instalasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.10 dan 2.11a yang dihitung dengan Persamaan 2-4 (Transpower, 2009:14) dan ketinggian minimum di luar instalasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.11b yang dihitung dengan Persamaan 2-5 (ABB, 2001:174).

$$H = N + 2440 \text{ mm (dengan nilai minimum 2500 mm)} \quad (2-4)$$

$$H' = N + 4500 \text{ mm (dengan nilai minimum 6000 mm)} \quad (2-5)$$



Gambar 2.10 Ketinggian Pemasangan Peralatan-Peralatan pada Latar Hubung
 Sumber: Transpower, 2009:14



a. Bagian dalam instalasi b. Bagian luar instalasi

Gambar 2.11 Pembatas dan Ketinggian pada Instalasi
 Sumber: ABB, 2001:180

Jarak aman minimum antar peralatan dengan memasang pembatas seperti dinding pejal, kawat jaring, dan rantai/tali. Pembatas untuk di dalam instalasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.11a dan dihitung dengan Persamaan 2-6 sampai 2-8. Pembatas untuk di luar instalasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.11b dan dihitung dengan Persamaan 2-9 dan 2-10 (ABB, 2001:174).

$$B_1 = N \text{ (untuk dinding panel pejal)} \quad (2-6)$$

$$B_2 = N + 100 \text{ mm (untuk kawat jaring)} \quad (2-7)$$

$$O_2 = N + 300 \text{ mm (untuk rantai/tali dengan nilai minimum 600 mm)} \quad (2-8)$$

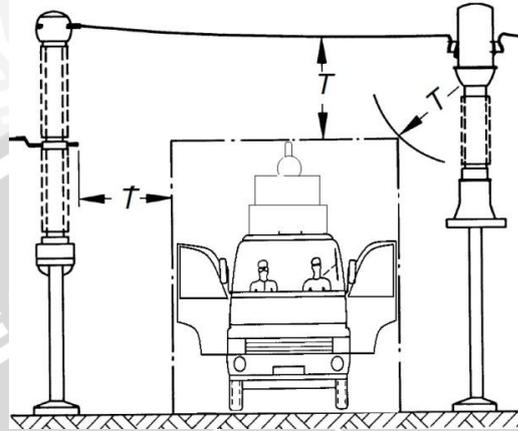
$$C = N + 1000 \text{ mm (untuk dinding panel pejal)} \quad (2-9)$$

$$E = N + 1500 \text{ mm (untuk kawat jaring)} \quad (2-10)$$

Jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan M_a untuk manusia pada instalasi luar ruangan adalah trotoar dengan lebar 1900 mm seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.10 (Transpower, 2009:11).

Jarak aman minimum jalan masuk transportasi T untuk kendaraan seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.12 yang dihitung dengan Persamaan 2-11 dengan terlebih dahulu ditentukan dimensi dari unit transportasi dalam keadaan pintu terbuka dan muatan yang dibawa tidak memasuki zona bahaya (ABB, 2001:179).

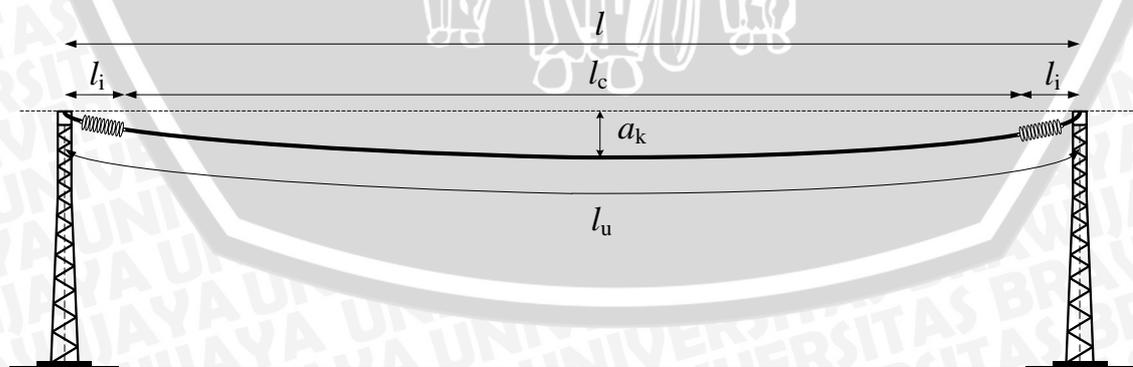
$$T = N + 100 \text{ mm (dengan nilai minimum 500 mm)} \quad (2-11)$$



Gambar 2.12 Jarak Aman Minimum Transportasi Latar Hubung Luar Ruangan

2.3.2 Panjang Busbar

Busbar biasanya digantung pada jarak gawang l antara dua penyangga melalui isolator rantai yang terbuat dari keramik atau kaca dengan panjang l_i pada kedua ujungnya. Jarak gawang l ditentukan oleh jarak aman minimum antar fasa dan antar saluran (antar transformator) yang terhubung ke busbar yang melintang pada gawang. Panjang busbar l_c merupakan konduktor pembawa arus (ABB, 2001: 133). Panjang uluran busbar l_u setelah mempertimbangkan andongan konduktor a_k (PT PLN, 2010:3.2). l_c , l_i , l , dan l_u seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Panjang Busbar dengan Andongan

- l : Jarak gawang
- l_i : Panjang isolator rantai
- l_c : Panjang busbar
- l_u : Panjang uluran busbar
- a_k : Andongan konduktor

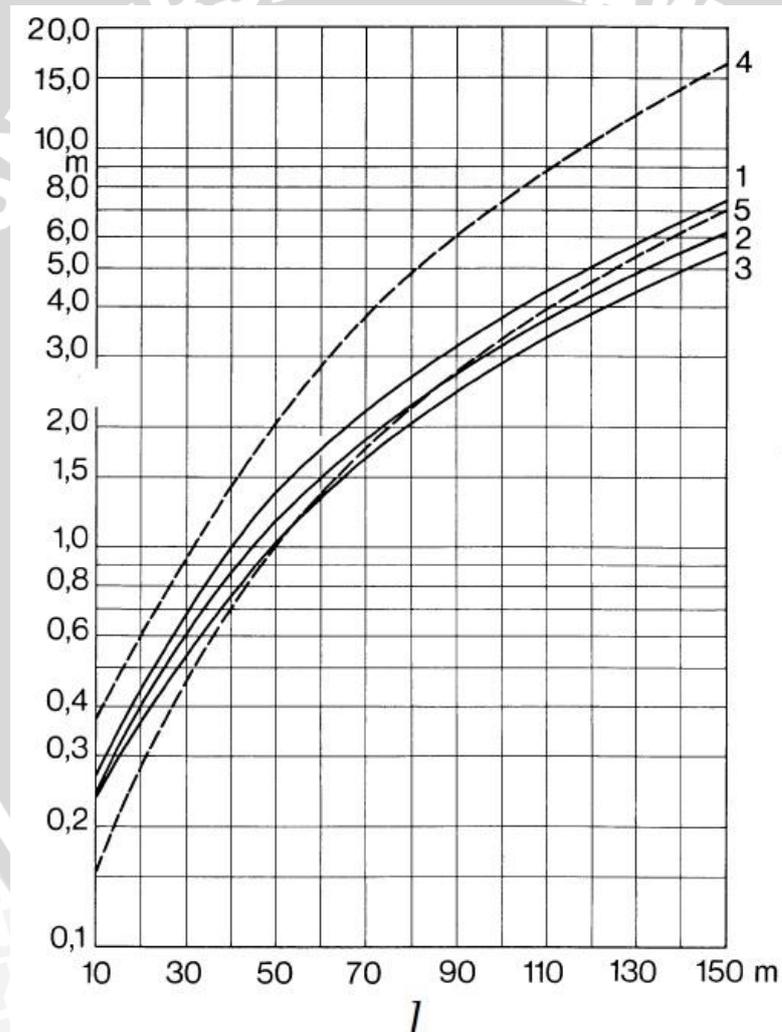
Hubungan l , l_i , l_c , l_u , a_k , dan b_c sesuai dengan Persamaan 2-12 dan 2-13 berikut.

$$l = l_c + 2l_i \quad (2-12)$$

$$l_u = l + \frac{8 \cdot (a_k)^2}{3 \cdot l} \quad (2-13)$$

1. Andongan Konduktor

Andongan konduktor a_k adalah jarak antara garis lurus horizontal dengan titik terendah konduktor yang dipengaruhi oleh berat kawat, beban tambahan, kekuatan tarik kawat, dan suhu kabel yang terjadi paaling besar pada suhu konduktor $+80 \text{ }^\circ\text{C}$. Andongan konduktor a_k ditentukan berdasarkan nilai tegangan, panjang konduktor, dan luas penampang konduktor dengan Gambar 2.14 (ABB, 2001:153).

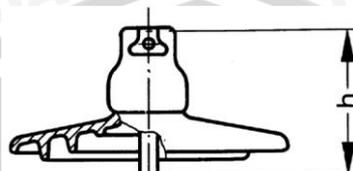


Gambar 2.14 Andongan konduktor hingga 150 m pada suhu konduktor $+80 \text{ }^\circ\text{C}$

- 1: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 500 mm^2 , 150 kV
- 2: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 300 mm^2 , 150 kV
- 3: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 200 mm^2 , 150 kV
- 4: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 200 mm^2 , 123 kV
- 5: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 400 mm^2 , 123 kV

2. Panjang Isolator Rantai

Panjang isolator rantai l_i tergantung dari jumlah dan tinggi masing-masing rantai isolator yang digunakan (ABB, 2001: 627). Tinggi rantai isolator dalam satuan mm antara lain 110, 127, 146, 170, 195, 205, dan 240 seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.15 (ABB, 2001: 637). Jumlah rantai isolator yang digunakan berdasarkan tegangan operasi maksimum seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.6.



Gambar 2.15 Tinggi Rantai Isolator h

Sumber: ABB, 2001:638

Tabel 2.6 Jumlah Isolator Rantai untuk Instalasi Latar Hubung Luar Ruangan

Tegangan nominal U_n	Tegangan maksimum peralatan U_m	Jumlah rantai isolator
kV	kV	
30	36	3
45	52	4
60	72,5	5
110	123	8
150	170	9
220	245	11
380	420	15
480	525	20

Sumber: ABB, 2001:642

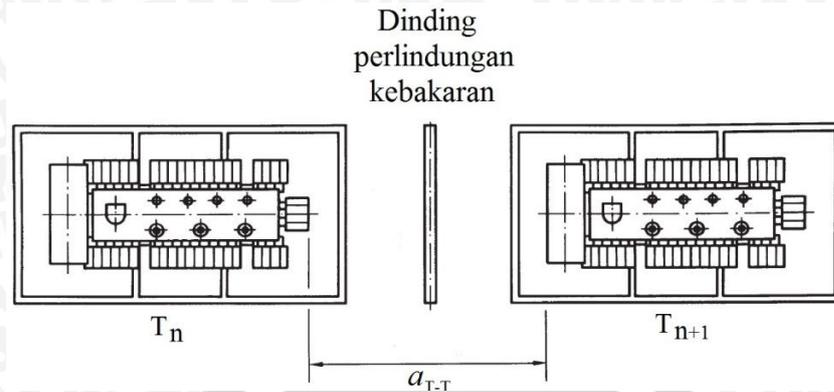
3. Jarak Aman Antar Transformator

Pada jarak antar transformator dipasang dinding perlindungan kebakaran seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.16 untuk mencegah kebakaran yang mungkin terjadi pada ruang transformator. Nilai jarak aman minimum antar transformator di mana pada jarak tersebut terdapat dinding perlindungan kebakaran seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.7 sesuai daya keluaran transformator (ABB, 2001:191).

Tabel 2.7 Jarak Aman Dinding Perlindungan Kebakaran

Daya keluaran transformator	Jarak aman N_{T-T}
MVA	m
1	3
10	5
40	10
200	15

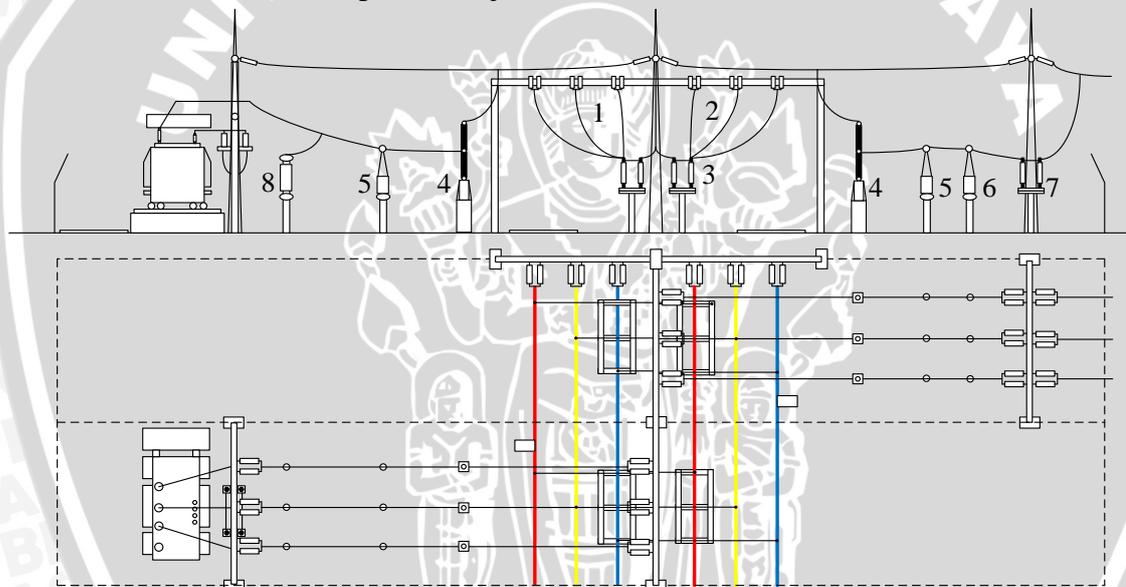
Sumber: ABB, 2001:194



Gambar 2.16 Jarak Aman Dinding Perlindungan Kebakaran pada Transformator T_n, T_{n+1} : Transformator bersebelahan
 a_{T-T} : Jarak aman transformator
 Sumber: ABB, 2001:194

2.3.3 Penggambaran Tata Letak Busbar

Tata letak busbar seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.17 berikut.



Gambar 2.17 Tata Letak Busbar pada Latar Hubung dengan Dua Busbar
 1: Busbar I
 2: Busbar II
 3: Pemisah busbar
 4: Pemutus daya
 5: Transformator arus
 6: Transformator tegangan
 7: Pemisah feeder
 8: Penangkap surja
 Sumber: ABB, 2001:519

2.4 Busbar saat Hubung Singkat

Busbar dirancang untuk arus beban dan hubung singkat sesuai dengan DIN EN 60865-1 karena jika hubung singkat timbul gaya yang sangat besar dan dapat menekan konduktor bahkan sampai bengkok yaitu gaya elektrodinamik (ABB, 2001:122). Gaya elektrodinamik ini menyebabkan konduktor dan penyangga tertekan oleh gaya dinamis, yaitu gaya tarik hubung singkat F_t dan gaya jatuh F_f (ABB, 2001:133). Selain itu gaya

elektrodinamik ini juga membuat ayunan dan andongan maksimum konduktor dan menyebabkan konduktor berayun ke atas, lalu ke samping, lalu ke bawah, atau bergerak dalam satu lingkaran tergantung pada berat konduktor serta durasi dan besarnya arus hubung singkat (ABB, 2001:142).

2.4.1 Gaya Tarik *Busbar* saat Hubung Singkat

Gaya tarik hubung singkat F_t yang dihasilkan selama ayunan dihitung dengan Persamaan 2-14 berikut (ABB, 2001:133).

$$F_t = F_{st} \cdot (1 + \varphi \cdot \psi) \quad (2-14)$$

Komponen horizontal tarikan konduktor statis F_{st} harus diperhitungkan, baik untuk suhu minimum lokal $-20\text{ }^\circ\text{C}$ yang bernilai 12126,4 N dan suhu operasional maksimum $+60\text{ }^\circ\text{C}$ yang bernilai 11370,4 N. Nilai yang lebih tinggi dari kedua gaya tarik dan perpindahan harus diperhitungkan untuk penentuan dimensi.

Parameter beban φ dihitung dengan Persamaan 2-15 berikut.

$$\varphi = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2} - 1) & \text{untuk } T_{k11} \geq T_{res}/4 \\ 3(r \sin \delta_k + r \cos \delta_k - 1) & \text{untuk } T_{k11} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (2-15)$$

Durasi hubung singkat relevan T_{k11} dengan nilai maksimal sebagai berikut.

$$T_{k11} = 0,4 T \quad (2-16)$$

Periode dari osilasi konduktor T dihitung dengan Persamaan 2-17 berikut.

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_c}{g_n}} \quad (2-17)$$

Periode resultan osilasi konduktor T_{res} dihitung dengan Persamaan 2-18 berikut.

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2 (\delta_1/90^\circ)^2}{64} \right]} \quad (2-18)$$

Rasio gaya r dihitung dengan Persamaan 2-19 berikut.

$$r = \frac{F_t}{g_n m'} \quad (2-19)$$

Kerapatan gaya elektrodinamik per satuan panjang F' ketika konduktor terkena hubung singkat dihitung dengan Persamaan 2-20 berikut.

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_{k2}^2}{a} \cdot \frac{l_c}{l} \text{ dengan } \frac{\mu_0}{2\pi} = 0,2 \text{ N/kA}^2 \quad (2-20)$$

I''_{k2} adalah nilai rms arus hubung singkat simetris awal dalam hubung singkat dua fasa yang dihitung dengan Persamaan 2-21 dengan I''_{k3} adalah nilai rms arus hubung singkat simetris awal dalam hubung singkat tiga fasa.

$$I''_{k2} = 0,75 \cdot I''_{k3} \quad (2-21)$$

a adalah jarak efektif konduktor fasa ke fasa yang nilainya sama dengan jarak aman minimum antar bagian aktif fasa ke fasa seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.8. l adalah jarak gawang antara dua penyangga dan l_c adalah panjang busbar yang merupakan konduktor pembawa arus.

m' adalah berat konduktor dengan beban tambahan bila ada. Beban tambahan berasal dari jumper pengumpulan arus dan penjatuh yang didistribusikan sepanjang rentang ke sub konduktor dengan nilai 1,431 kg/m. g_n adalah konstanta gravitasi yang bernilai 9,80665 m/s² atau 9,80665 N/kg.

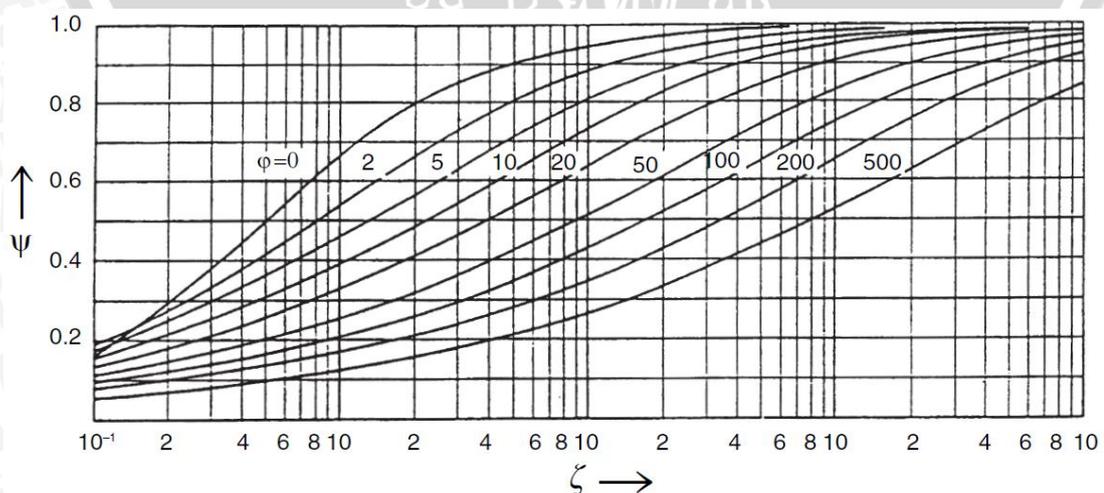
Sudut ayunan di akhir aliran arus hubung singkat δ_k dihitung dengan Persamaan 2-22 berikut.

$$\delta_k = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \frac{T_{k11}}{T_{res}} \right) \right] & \text{untuk } 0 \leq \frac{T_{k11}}{T_{res}} \leq 0,5 \\ 2\delta_1 & \text{untuk } \frac{T_{k11}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad (2-22)$$

δ_1 merupakan arah gaya resultan pada konduktor (dinyatakan dalam derajat) yang dapat dihitung dengan Persamaan 2-23 berikut.

$$\delta_1 = \arctan r \quad (2-23)$$

Faktor reaksi rentang ψ adalah fungsi dari faktor tekanan konduktor utama ζ dan parameter beban ϕ , seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.18 berikut.



Gambar 2.18 Faktor Reaksi Rentang ψ Terhadap Tekanan ζ dan Beban ϕ
Sumber: ABB, 2001:136

Faktor tekanan konduktor utama ζ dihitung dengan Persamaan 2-24 berikut.

$$\zeta = \frac{(g_n m' l)^2}{24 F_{st}^3 N} \quad (2-24)$$

Standar kekakuan N dihitung dengan Persamaan 2-25 berikut.

$$N = \frac{1}{S_l} + \frac{1}{E_s A} \quad (2-25)$$

S adalah konstanta pegas dari rentang yang dihasilkan dari elastisitas penyangga pada saat hubung singkat. Untuk kondisi konduktor yang tegang antara portal, konstanta pegas harus ditentukan secara terpisah dengan nilai yang umum adalah 500 N/mm.

Modulus elatisitas efektif E_s dihitung dengan Persamaan 2-26 berikut.

$$E_s = \begin{cases} E \left[0,3 + 0,7 \sin \left(\frac{F_{st}}{A \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] & \text{untuk } \frac{F_{st}}{A} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{untuk } \frac{F_{st}}{A} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad (2-26)$$

σ_{fin} bernilai 50 N/mm², di atas σ_{fin} modulus elastisitas bernilai konstan. A adalah luas penampang konduktor.

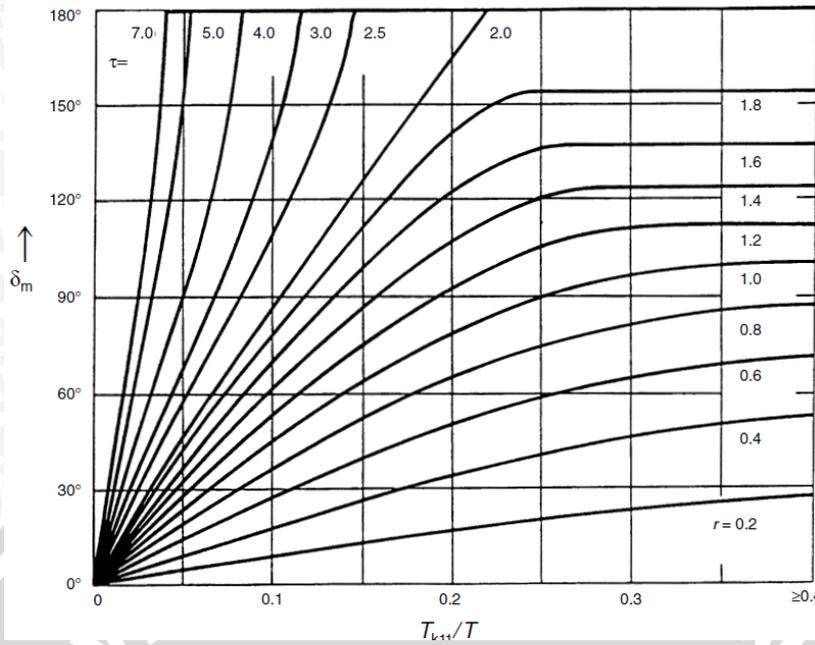
E adalah modulus elastisitas, yaitu modulus Young dari konduktor.

2.4.2 Gaya Jatuh Busbar saat Hubung Singkat

Setelah hubung singkat terjadi, konduktor akan berosilasi atau jatuh kembali ke keadaan awalnya. Nilai maksimum tarikan konduktor yang terjadi pada akhir jatuh, disebut sebagai gaya jatuh F_f .

F_f terutama tergantung pada sudut δ_m yaitu ayunan konduktor selama aliran arus hubung singkat. δ_m ditentukan berdasarkan fungsi dari durasi hubung singkat relevan T_{k11} dibandingkan dengan periode osilasi konduktor T dengan nilai rasio gaya r tertentu menggunakan Gambar 2.19 (ABB, 2001:136). Gaya jatuh tidak perlu dipertimbangkan ketika rasio gaya $r \leq 0,6$ atau sudut ayunan maksimum $\delta_m < 70^\circ$. Untuk semua kondisi lain berlaku gaya jatuh sesuai Persamaan 2-27 berikut (ABB, 2001:133).

$$F_f = 1,2 F_{st} \sqrt{1 + 8 \zeta \frac{\delta_m}{180^\circ}} \quad (2-27)$$



Gambar 2.19 Sudut Maksimum Ayunan δ_m sebagai Fungsi dari Durasi Hubung Singkat yang Relevan T_{k11} berdasarkan Periode Osilasi Konduktor T
 Sumber: ABB, 2001:136

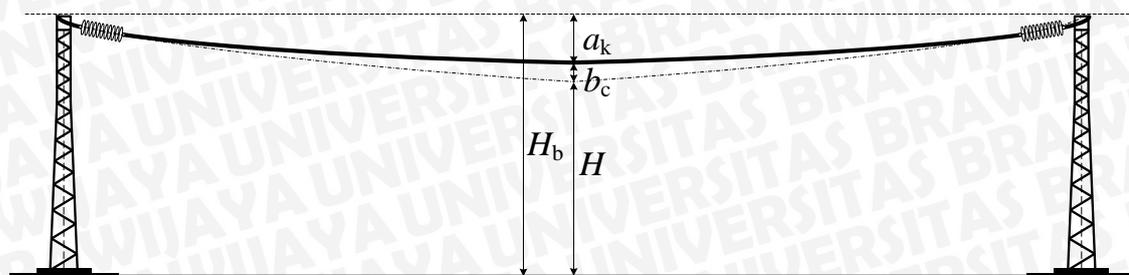
2.4.3 Gaya pada Penyangga saat Hubung Singkat

Tiang pada sistem tenaga listrik berfungsi sebagai tumpuan penghantar. Tiang menerima gaya-gaya mekanis berupa gaya tarik dan gaya jatuh akibat berat penghantar. Besarnya gaya-gaya tersebut berbeda sesuai dengan fungsi tiang sebagai tiang ujung, tiang tengah, atau tiang sudut. Gaya mekanis pada tiang ujung adalah setengah dari gaya mekanis penghantar dengan panjang tertentu. Gaya mekanis pada tiang tengah dengan deviasi sudut lintasan 0° tidak menerima gaya mekanis akibat massa penghantar dengan panjang yang sama karena gaya tersebut saling menghilangkan pada jarak gawang yang berdampingan. Tiang sudut adalah tiang di mana deviasi lintasan penghantar sampai dengan 90° (PT PLN, 2010:3.1).

2.4.4 Andongan Maksimum Busbar saat Hubung Singkat

Andongan maksimum konduktor di tengah rentang b_c pada saat hubung singkat menyebabkan ketinggian minimum pemasangan busbar H_b lebih besar dari ketinggian minimum bagian aktif H yang sudah mempertimbangkan andongan konduktor seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.20. Andongan maksimum konduktor di tengah rentang b_c pada saat hubung singkat yang dihitung dengan Persamaan 2-28 berikut (ABB, 2001:135).

$$b_c = \frac{m v g_n l^2}{8 F_{St}} \tag{2-28}$$



Gambar 2.20 Ketinggian Minimum Pemasangan Busbar

- H : Ketinggian minimum bagian aktif
- H_b : Ketinggian minimum pemasangan busbar
- a_k : Andongan konduktor
- b_c : Andongan maksimum konduktor di tengah rentang pada saat hubung singkat

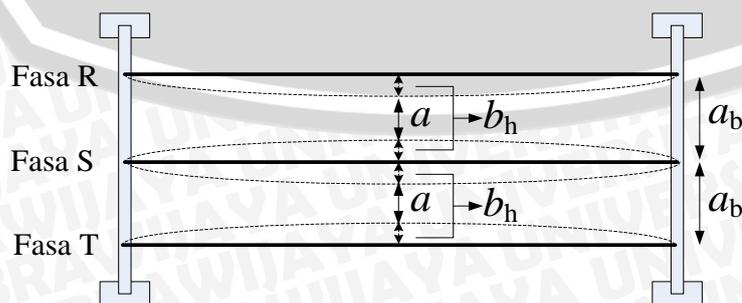
Ketinggian minimum pemasangan busbar H_b untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dengan mempertimbangkan andongan konduktor a_k dan andongan maksimum konduktor di tengah rentang b_c pada saat hubung singkat dihitung dengan Persamaan 2-29 berikut.

$$H_b = H + a_k + b_c \tag{2-29}$$

2.4.5 Ayunan Maksimum Busbar saat Hubung Singkat

Setelah konduktor berayun karena gaya elektrodinamik pada saat hubung singkat, konduktor tertarik (faktor C_D) dan kurva konduktor menjadi cacat (faktor C_F), menyebabkan konduktor berayun lebih ke luar dari kelenturan statisnya yang diprediksi. Ayunan maksimum konduktor di tengah rentang b_h pada saat hubung singkat menyebabkan jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa busbar a_b lebih besar dari jarak aman minimum fasa ke fasa a seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.21. Ayunan maksimum konduktor di tengah rentang b_h pada saat hubung singkat dihitung dengan Persamaan 2-30 berikut (ABB, 2001:142).

$$b_h = \begin{cases} C_F C_D b_c \sin \delta_1 & \text{untuk } \delta_m \geq \delta_1 \\ C_F C_D b_c \sin \delta_m & \text{untuk } \delta_m < \delta_1 \end{cases} \tag{2-30}$$



Gambar 2.21 Jarak Aman Minimum Pemasangan Fasa ke Fasa Busbar

- a : Jarak aman minimum fasa ke fasa a
- a_b : Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa busbar

b_h : Ayunan maksimum konduktor di tengah rentang pada saat hubung singkat

Faktor C_F dan faktor C_D dihitung dengan Persamaan 2-31 dan 2-32 berikut.

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{untuk } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1r & \text{untuk } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{untuk } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (2-31)$$

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_c}\right)^2 (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th})} \quad (2-32)$$

Perluasan konduktor panas ε_{th} dihitung dengan Persamaan 2-33 berikut.

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left(\frac{I_{k3}}{A}\right)^2 \frac{T_{res}}{4} & \text{untuk } T_{k11} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ c_{th} \left(\frac{I_{k3}}{A}\right)^2 T_{k1} & \text{untuk } T_{k11} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (2-33)$$

Perluasan konduktor elastis ε_{ela} dihitung dengan Persamaan 2-34 berikut.

$$\varepsilon_{ela} = N(F_t - F_{st}) \quad (2-34)$$

Dengan faktor material konduktor c_{th} dihitung dengan Persamaan 2-35 berikut.

$$c_{th} = \begin{cases} 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{m^4}{A^2 s} & \text{untuk konduktor aluminium} \\ 0,088 \cdot 10^{-18} \frac{m^4}{A^2 s} & \text{untuk konduktor tembaga} \end{cases} \quad (2-35)$$

Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa busbar a_b untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dengan mempertimbangkan ayunan maksimum busbar di tengah rentang b_h saat hubung singkat dihitung dengan Persamaan 2-36 berikut..

$$a_b = a + (2 \cdot b_h) \quad (2-36)$$

2.5 Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa

Gangguan hubung singkat adalah suatu kondisi pada sistem daya di mana penghantar yang berarus terhubung dengan tanah, seperti gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dan dua fasa ke tanah, atau penghantar yang berarus terhubung dengan penghantar lain, seperti gangguan hubung singkat dua fasa dan tiga fasa (Suswanto, 2009:252). Analisis arus hubung singkat diperlukan dalam perencanaan busbar karena busbar tidak hanya dirancang untuk arus beban saja, tetapi juga untuk melawan arus hubung singkat maksimum yang terjadi (ABB, 2001:122). Menurut IEC 60076-5 gangguan hubung singkat yang sering dianggap sebagai gangguan yang paling berbahaya dibanding jenis gangguan hubung singkat yang lainnya adalah gangguan

hubung singkat tiga fasa. Tujuan menganalisis gangguan hubung singkat tiga fasa adalah sebagai berikut (Suswanto, 2009:245).

1. Untuk menentukan arus maksimum dan minimum hubung singkat tiga fasa.
2. Untuk menentukan distribusi arus gangguan dan tingkat tegangan busbar selama gangguan.

2.5.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat Tiga Fasa

Gangguan hubung singkat tiga fasa seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.22 merupakan gangguan hubung singkat simetris, di mana arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi sehingga tidak ada urutan negatif dan urutan nol seperti pada gangguan tidak simetris. Oleh karena itu gangguan ini dapat dianalisa hanya dengan menggunakan komponen urutan positifnya saja sesuai dengan Persamaan 2-37 berikut (Gonen, 1986:284).

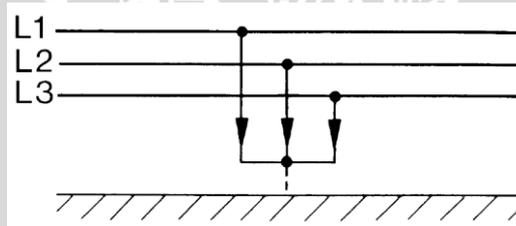
$$I_{f3 \text{ fasa}} = \frac{V_f}{Z_1} \quad (2-37)$$

Keterangan:

$I_{f3 \text{ fasa}}$: Arus hubung singkat tiga fasa

V_f : Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan

Z_1 : Impedansi urutan positif jaringan dilihat dari titik gangguan



Gambar 2.22 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Sumber: ABB, 2001:73

2.5.2 Impedansi Urutan Positif Ekuivalen Jaringan

Titik-titik sambungan yang terbentuk jika beberapa elemen (R , C , atau suatu sumber tegangan) dihubungkan satu sama lain pada ujung-ujungnya dinamakan simpul-simpul besar atau bus. Perumusan impedansi atau admitansi yang sistematis ditentukan pada bus-bus suatu rangkaian dalam bentuk matriks dan lebih mudah ditentukan melalui diagram satu garis dan diagram reaktansi sistem dengan memberi nomor pada bus. Matriks admitansi ditunjukkan dalam Persamaan 2-38 berikut (Stevenson, 1996:158).

$$Y_{\text{bus}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

Urutan subskrip-subskrip Y adalah sesuai dengan sebab-akibat, yaitu subskrip pertama adalah untuk bus di mana arus itu dirumuskan dan subskrip kedua adalah untuk tegangan yang menyebabkan komponen arus itu. Matriks Y ditunjukkan dengan Y_{bus} dan dinamakan matriks admitansi bus. Matriks ini simetris terhadap diagonal utamanya. Admitansi-admitansi Y_{11} , Y_{22} , sampai Y_{nn} dinamakan admitansi sendiri dan masing-masing nilainya sama dengan jumlah semua admitansi yang berujung pada bus yang ditandai pada subskrip yang berulang. Admitansi yang lain adalah admitansi bersama bus-bus itu dan berdasarkan hukum Kirchoff maka masing-masing nilainya sama dengan jumlah negatif semua admitansi yang dihubungkan langsung antara bus yang disebutkan menurut subskrip gandanya (Stevenson, 1996:160).

Matriks impedansi bus dapat ditentukan secara langsung atau dengan cara membalikkan matriks admitansi bus Y_{bus} sesuai dengan Persamaan 2-39 berikut.

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \quad (2-39)$$

Unsur-unsur impedansi Z_{bus} pada diagonal utama dinamakan impedansi titik penggerak bus-bus dan unsur-unsur di luar diagonal tersebut dinamakan impedansi pemindah bus-bus itu (Stevenson, 1996:168).

2.5.3 Impedansi Urutan Positif Generator

Impedansi urutan positif generator dihitung dengan Persamaan 2-40 berikut (ABB, 2001:83).

$$Z_Q = R_Q + jX_Q \quad (2-40)$$

Nilai R pada generator ditentukan sesuai dengan Persamaan 2-41 berdasarkan teraan daya generator sebagai berikut (ABB, 2001:84).

$$\begin{aligned} R &= 0,05 X_d'' \text{ untuk daya } \geq 100 \text{ MVA (generator tegangan tinggi)} \\ R &= 0,07 X_d'' \text{ untuk daya } < 100 \text{ MVA (generator tegangan tinggi)} \\ R &= 0,15 X_d'' \text{ untuk generator tegangan rendah} \end{aligned} \quad (2-41)$$

Nilai reaktansi urutan positif mesin sinkron dalam presentase seperti ditunjukkan dalam Tabel 2.8 berikut.

Tabel 2.8 Reaktansi Urutan Mesin Sinkron

Reaktansi	Kutub menonjol	
	Dengan belitan peredam	Tanpa belitan peredam
X_d'' (%)	12-30	20-40

Sumber: ABB, 2001:83

Karena untuk generator tegangan tinggi nilai R sangat kecil, maka impedansi urutan positif dapat diwakili oleh reaktansi urutan positif.

2.5.4 Impedansi Urutan Positif Transformator

Impedansi urutan positif transformator biasanya dinyatakan dalam jatuh tegangan impedansi $\underline{U}_k\%$ yang ditentukan oleh tingkat tegangan sisi sekunder transformator dan jatuh tegangan ohmik $\underline{U}_R\%$ yang ditentukan dari teraan daya transformator. Nilai-nilai $\underline{U}_k\%$ dan $\underline{U}_R\%$ ditunjukkan dalam Tabel 2.9 dan 2.10 berikut (ABB, 2001:83).

Tabel 2.9 Jatuh Tegangan Impedansi Transformator

Tegangan teraan sisi sekunder transformator (kV)	5-10	110	220
$\underline{U}_k\%$	3,5-8	9-12	10-14

Sumber: ABB, 2001:83

Tabel 2.10 Jatuh Tegangan Ohmik Transformator

Daya teraan transformator (MVA)	6,3	12,5	31,5	>31,5
$\underline{U}_R\%$	0,7-0,85	0,6-0,7	0,5-0,6	<0,5

Sumber: ABB, 2001:83

Pada transformator juga hanya digunakan nilai reaktansi urutan positifnya sebagai impedansi urutan positif karena nilai R sangat kecil. Reaktansi dihitung dengan Persamaan 2-42 bila diketahui nilai impedansi dan R sebagai berikut (ABB, 2001:83).

$$X_Q = \sqrt{Z_Q^2 - R_Q^2} \quad (2-42)$$

2.5.5 Nilai Dasar

Sistem tenaga listrik dioperasikan pada tingkat tegangan yang dinyatakan dalam kilovolt dan tingkat daya yang dinyatakan dalam kilowatt atau megawatt dan kilovolt-ampere atau megavolt-ampere. Kuantitas-kuantitas tersebut bersama ampere dan ohm dapat dinyatakan dalam persentase atau per unit dari suatu nilai dasar yang ditentukan karena lebih sederhana daripada menggunakan langsung nilai-nilai ampere, ohm, dan volt yang sebenarnya. Nilai per unit suatu kuantitas adalah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya dan nilai dalam persentase adalah 100 kali nilai per unit. Pemilihan dua nilai dasar untuk kuantitas-kuantitas tersebut akan menentukan nilai dasar untuk dua kuantitas lainnya sesuai dengan Persamaan 2-43 dan 2-44 berikut.

$$I_{\text{dasar}} = \frac{MVA_{\text{dasar}}}{\sqrt{3} \cdot kV_{\text{dasar}}} \quad (2-43)$$

$$Z_{\text{dasar}} = \frac{(kV_{\text{dasar}})^2}{MVA_{\text{dasar}}} \quad (2-44)$$

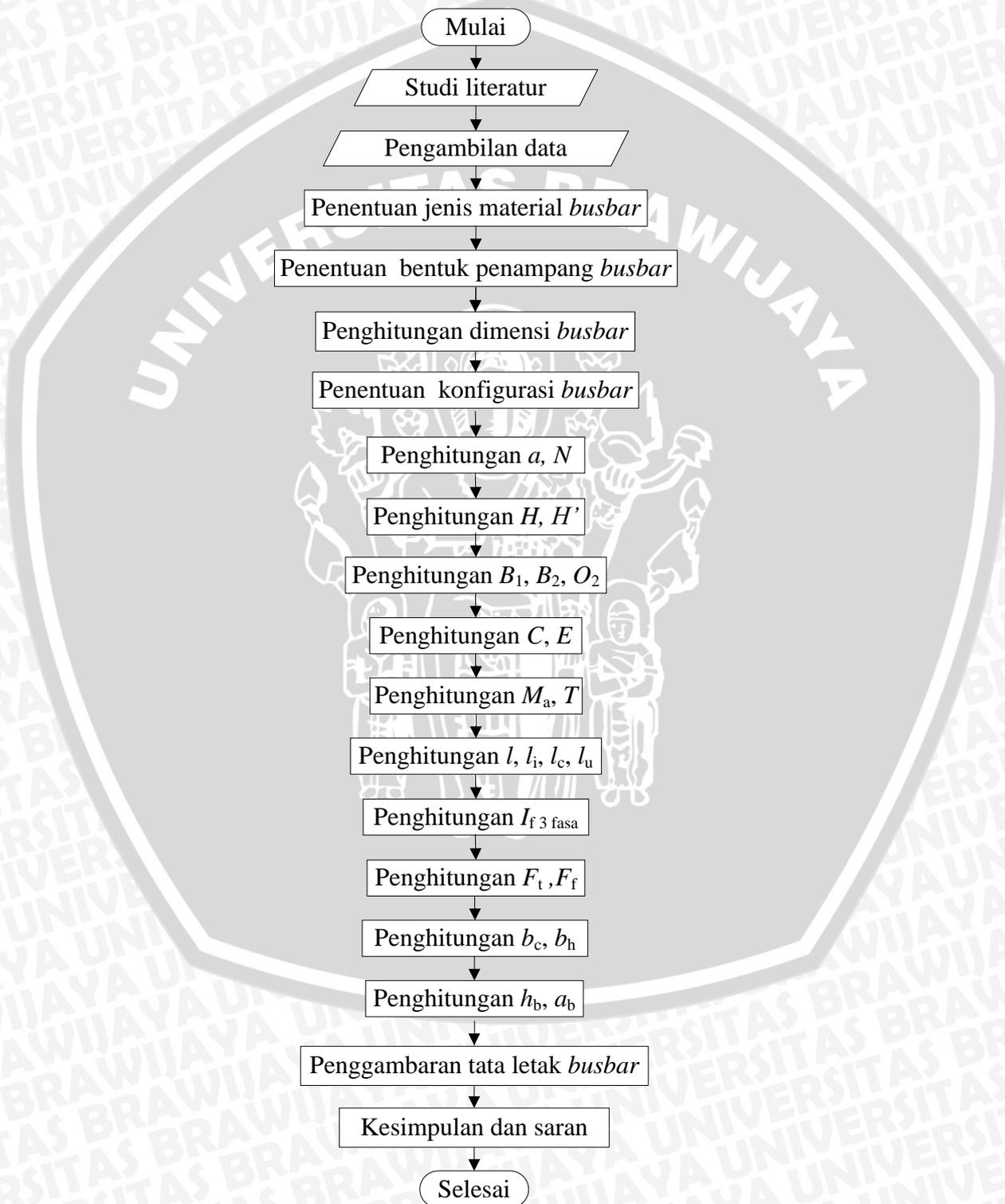
Kadang-kadang impedansi per unit untuk suatu komponen dari suatu sistem dinyatakan menurut dasar yang berbeda dengan dasar yang dipilih untuk bagian dari sistem di mana komponen tersebut berada. Karena semua impedansi dalam bagian mana pun dari suatu sistem harus dinyatakan dengan dasar impedansi yang sama, maka dalam perhitungannya kita perlu mempunyai cara untuk dapat mengubah impedansi per-unit dari suatu dasar ke dasar yang lain. Untuk mengubah dari impedansi per-unit menurut suatu dasar yang diberikan menjadi impedansi per-unit menurut suatu dasar yang baru dihitung dengan Persamaan 2-45 berikut (Stevenson, 1996:29).

$$Z_{\text{baru}} (pu) = Z_{\text{diberikan}} (pu) \cdot \left(\frac{kV_{\text{diberikan}}}{kV_{\text{baru}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{MVA_{\text{baru}}}{MVA_{\text{diberikan}}} \right) \quad (2-45)$$



BAB III METODE PENELITIAN

Dalam metode penelitian ini akan diuraikan cara-cara yang dilakukan dalam proses perencanaan busbar pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem. Metode yang akan dilakukan dalam penelitian ini seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian

Keterangan:

- a : Jarak aman minimum fasa ke fasa
 N : Jarak aman minimum fasa ke bumi
 H : Ketinggian minimum di dalam instalasi
 H' : Ketinggian minimum di luar instalasi
 B_1 : Jarak aman minimum antar peralatan di dalam instalasi pembatas dinding pejal
 B_2 : Jarak aman minimum antar peralatan di dalam instalasi pembatas kawat jaring
 O_2 : Jarak aman minimum antar peralatan di dalam instalasi pembatas rantai/tali
 C : Jarak aman minimum antar peralatan di luar instalasi pembatas dinding pejal
 E : Jarak aman minimum antar peralatan di luar instalasi pembatas kawat jaring
 M_a : Jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan untuk manusia
 T : Jarak aman minimum jalan masuk transportasi untuk kendaraan
 l : Jarak gawang
 l_i : Panjang isolator rantai
 l_c : Panjang busbar
 l_u : Panjang uluran busbar
 $I_{f3 \text{ fasa}}$: Arus hubung singkat tiga fasa
 F_t : Gaya tarik pada busbar saat hubung singkat
 F_f : Gaya jatuh pada busbar saat hubung singkat
 b_c : Andongan maksimum konduktor di tengah rentang b_c pada saat hubung singkat
 b_h : Ayunan maksimum konduktor di tengah rentang b_c pada saat hubung singkat
 h_b : Ketinggian minimum pemasangan busbar
 a_b : Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa busbar

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan sebagai dasar teori yang menunjang penyelesaian penelitian dengan mengkaji literatur dari buku, jurnal, skripsi, dan internet yang berkaitan dengan perencanaan busbar yang meliputi jenis material, bentuk penampang, kemampuan hantar arus, dimensi, konfigurasi, analisis hubung singkat, gaya pada saat hubung singkat, jarak aman, dan tata letak busbar.

3.2 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam penelitian. Data-data yang diperlukan merupakan data sekunder sebagai berikut.

1. Denah lokasi PLTA Baliem.
2. Data generator 5 MW 11 kV berjumlah 10 buah.
3. Data transformator 13 MVA 11 kV/150kV berjumlah 5 buah.

3.3 Perhitungan dan Analisis Data

1. Penentuan Jenis Material *Busbar*

Penentuan material *busbar* dilakukan berdasarkan dasar teori pada sub bab 2.1.1 dan Tabel 2.1 dan 2.2 yang disesuaikan dengan keadaan PLTA Baliem.

2. Penentuan Bentuk Penampang *Busbar*

Penentuan bentuk penampang *busbar* dilakukan berdasarkan teori pada sub bab 2.1.2 yang disesuaikan dengan keadaan PLTA Baliem.

3. Penghitungan Dimensi *Busbar*

- a. Penghitungan daya semu dengan Persamaan 2-3.
- b. Penghitungan arus nominal tiga fasa pada *busbar* dengan Persamaan 2-2.
- c. Penghitungan kemampuan hantar arus *busbar* dengan Persamaan 2-1.
- d. Penentuan dimensi *busbar* dilakukan berdasarkan Tabel 2.3.

4. Penentuan Konfigurasi *Busbar*

Penentuan konfigurasi *busbar* dilakukan berdasarkan teori pada sub bab 2.2 dan Tabel 2.4 yang disesuaikan dengan keadaan PLTA Baliem.

5. Penghitungan Parameter Tata Letak *Busbar*

- a. Penghitungan jarak aman minimum antar bagian aktif dan antara bagian aktif fasa ke bumi dengan Tabel 2.5.
- b. Penghitungan ketinggian minimum di dalam instalasi dengan Persamaan 2-4 dan di luar instalasi dengan Persamaan 2-5.
- c. Penghitungan jarak aman minimum antar peralatan di dalam instalasi dengan Persamaan 2-6 sampai 2-8.
- d. Penghitungan jarak aman minimum antar peralatan di luar instalasi dengan Persamaan 2-9 dan 2-10.
- e. Penentuan jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan untuk manusia.
- f. Penghitungan jarak aman minimum jalan masuk transportasi untuk kendaraan dengan Persamaan 2-11.

6. Penghitungan Panjang *Busbar*

- a. Penghitungan jarak aman transformator dan jarak gawang dengan Tabel 2.7.
- b. Penentuan jumlah dan panjang rantai isolator dengan Tabel 2.6.

- c. Penghitungan panjang *busbar* dengan dengan Persamaan 2-12.
- d. Penghitungan andongan *busbar* dengan Gambar 2.12.
- e. Penghitungan panjang uluran *busbar* dengan dengan Persamaan 2-13.
7. Analisis Arus Hubung Singkat Tiga Fasa
 - a. Penentuan nilai tegangan dasar dan daya dasar.
 - b. Penghitungan impedansi urutan positif generator dengan Persamaan 2-40, 2-41, 2-45, dan Tabel 2.8.
 - c. Penghitungan impedansi urutan positif transformator dengan Persamaan 2-42, dan 2-45 dan Tabel 2.9 dan 2.10.
 - d. Penghitungan impedansi urutan positif ekivalen jaringan dengan Persamaan 2-38 dan 2-39.
 - e. Penghitungan arus hubung singkat tiga fasa dengan Persamaan 2-37 dan 2-43.
8. Penghitungan Andongan Maksimum *Busbar* saat Hubung Singkat
 - a. Penghitungan berat konduktor dengan Tabel 2.3.
 - b. Penghitungan andongan maksimum *busbar* di tengah rentang b_c pada saat hubung singkat dengan Persamaan 2-28.
 - c. Penghitungan ketinggian minimum pemasangan *busbar* dengan Persamaan 2-29.
9. Penghitungan Gaya Tarik *Busbar* saat Hubung Singkat
 - a. Penghitungan nilai rms arus hubung singkat simetris awal dengan Persamaan 2-21.
 - b. Penghitungan kerapatan gaya elektrodinamik dengan Persamaan 2-20.
 - c. Penghitungan rasio gaya dengan Persamaan 2-19.
 - d. Penghitungan arah gaya resultan pada konduktor dengan Persamaan 2-23.
 - e. Penghitungan periode osilasi konduktor dengan Persamaan 2-17.
 - f. Penghitungan durasi hubung singkat relevan dengan Persamaan 2-16.
 - g. Penghitungan periode resultan osilasi konduktor dengan Persamaan 2-18.
 - h. Penghitungan parameter beban dengan Persamaan 2-15.
 - i. Penghitungan modul elatisitas efektif dengan Persamaan 2-26 dan Tabel 2.3.
 - j. Penghitungan standar kekakuan dengan Persamaan 2-25.
 - k. Penghitungan faktor tekanan konduktor utama dengan Persamaan 2-24.
 - l. Penghitungan faktor reaksi rentang dengan Gambar 2.18.
 - m. Penghitungan gaya tarik saat hubung singkat dengan Persamaan 2-14.

10. Penghitungan Gaya Jatuh *Busbar* saat Hubung Singkat

Penghitungan gaya jatuh dengan Persamaan 2-27 dan Gambar 2.19.

11. Penentuan Gaya pada Penyangga saat Hubung Singkat

Penentuan gaya pada penyangga berdasarkan teori pada sub bab 2.4.3 yang disesuaikan dengan keadaan PLTA Baliem.

12. Penghitungan Ayunan Maksimum *Busbar* saat Hubung Singkat

a. Penghitungan perluasan konduktor elastis dengan Persamaan 2-34.

b. Penghitungan perluasan konduktor panas dengan Persamaan 2-33.

c. Penghitungan faktor C_F dengan Persamaan 2-31.

d. Penghitungan faktor C_D dengan Persamaan 2-32.

e. Penghitungan ayunan maksimum *busbar* di tengah rentang b_h saat hubung singkat dengan Persamaan 2-30.

d. Penghitungan jarak aman minimum pemasangan *busbar* dengan Persamaan 2-36.

13. Penggambaran Tata Letak *Busbar*

Penggambaran tata letak *busbar* dengan referensi Gambar 2.17.

3.4 Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan hasil perhitungan dan analisis dalam perencanaan *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem. Kemudian dicantumkan saran kepada pembaca yang akan melakukan penelitian yang berkaitan dengan penelitian ini yang meliputi hal-hal yang menjadi kendala dalam penelitian ataupun hal-hal yang masih memerlukan kajian lebih dalam lagi.

BAB IV

PERENCANAAN *BUSBAR* PADA LATAR HUBUNG 150 kV DI PLTA BALIEM

Pada bab ini akan dibahas mengenai perencanaan *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem. Beberapa hal yang akan dibahas adalah PLTA Baliem secara umum, penentuan jenis material *busbar*, penentuan bentuk penampang *busbar*, penentuan dimensi *busbar*, penentuan konfigurasi *busbar*, analisis hubung singkat tiga fasa, penghitungan gaya pada *busbar* saat hubung singkat, dan penggambaran tata letak *busbar* beserta jarak aman minimumnya pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem.

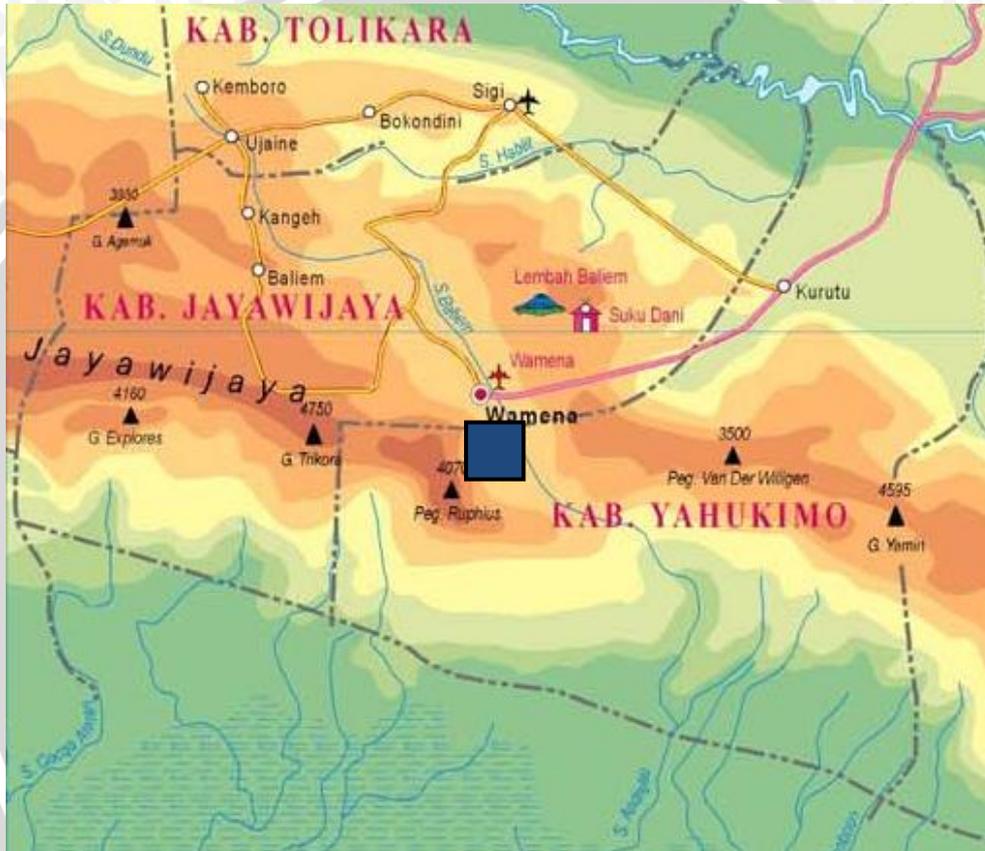
4.1 PLTA Baliem

Berdasarkan hasil *Hydro Power Potentials Study* (HPPS) yang dilakukan tahun 1999, sepanjang sungai Baliem memiliki potensi untuk membangkitkan listrik hingga 880 MW. PT PLN (Persero) mulai membangun Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA) Baliem dengan kapasitas terpasang 50 MW yang terdiri atas 10 unit generator berkapasitas masing-masing 5 MW. PLTA ini akan memanfaatkan potensi aliran air sungai Baliem, Provinsi Papua yang ditargetkan beroperasi komersial pada tahun 2017 yang nantinya akan dapat menghasilkan energi listrik sebanyak 361 GWh/tahun. PLTA Baliem sendiri memiliki potensi untuk dikembangkan hingga 170 MW. Saat ini pembangkit listrik yang beroperasi untuk memasok listrik pada sistem kelistrikan Wamena adalah PLTMH Walesi.

Sesuai Surat Persetujuan Izin Prinsip Pembangunan PLTA Baliem 50 MW (5x10 MW) dari Gubernur Papua Nomor: 671/1339/SET, tanggal 13 April 2012 sebagai berikut (<http://www.pln.co.id/uipkitsulmapa/?p=411>).

1. Secara geografis berada di Provinsi Papua tepatnya pada posisi $4^{\circ}6'21,7''$ LS - $4^{\circ}16'10,5''$ LS dan $138^{\circ}56'56''$ BT - $139^{\circ}4'6,6''$ BT.
2. Secara administratif berlokasi di Desa Kutele dan Air Garam Kecamatan Kurima Kabupaten Yahukimo Provinsi Papua, di mana sumber airnya dari Sungai Baliem.
3. Kondisi lahan saat ini masih berupa hutan dengan tanaman campuran yang berstatus tanah adat.

Lokasi PLTA Baliem pada peta Indonesia dan peta Provinsi Papua seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.1.



■ PLTA Baliem

Gambar 4.1 Lokasi PLTA Baliem

Sumber: <http://downloaddesain.com/tag/peta-indonesia-cdr> dan <https://saripedia.wordpress.com/tag/peta-provinsi-indonesia-terbaru/>

PLTA Baliem memanfaatkan potensi aliran air sungai Baliem yang mengalir dari arah barat laut ke arah tenggara. Pekerjaan Pembangunan PLTA Baliem terdiri atas dua pekerjaan yaitu pembangunan akses jalan menuju lokasi proyek PLTA dari jalan yang ada sepanjang kurang lebih 20 km dengan menyusuri daerah lereng pegunungan dan pembangunan utama yang meliputi pekerjaan sipil, pekerjaan metal, pekerjaan mekanik elektrik, saluran transmisi, dan gardu induk. Saluran transmisi yang direncanakan adalah saluran 150 kV sepanjang kurang lebih 35 km yang akan

4.2 Penentuan Jenis Material, Bentuk Penampang, dan Dimensi *Busbar* pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

Penentuan material *busbar*, bentuk penampang *busbar*, dan dimensi *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem adalah sebagai berikut.

4.2.1 Penentuan Jenis Material *Busbar* pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

Penentuan jenis material *busbar* dilakukan berdasarkan dasar teori pada sub bab 2.1.1. Dari dasar teori jenis material yang sering digunakan sebagai *busbar* adalah aluminium dan tembaga. Perbandingan berbagai sifat material aluminium dan tembaga dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan 2.2 tentang nilai-nilai khas untuk sifat fisik material konduktor dan perbandingan sifat paling penting dari bahan konduktor yang umum. Selain dari tabel-tabel tersebut, dari uraian dasar teori pada sub bab 2.1.1 dapat dibuat Tabel 4.3 tentang perbandingan aluminium dan tembaga sebagai berikut.

Tabel 4.3 Perbandingan Aluminium dan Tembaga

Aluminium	Tembaga
Konduktivitas panas yang tinggi	Konduktivitas listrik paling tinggi, kecuali perak murni
Konduktivitas listrik yang tinggi	Konduktivitas panas yang tinggi
Ketahanan korosi yang baik dalam atmosfer biasa	Ketahanan korosi yang baik
Keuletan yang cukup tinggi	Keuletan yang tinggi
	Kelunakan yang tinggi
Usur hubung singkat hanya memberikan kenaikan untuk non-konduktor	Pengubahan bentuk dan penyambungan yang baik
Dapat dengan cepat terhubung kembali setelah busur hubung singkat	Logam yang memiliki kekuatan rendah
Hubungan fisik dan koneksi perangkat tambahan sulit	Rentan terhadap korosi retak tegang
Mudah dikombinasikan dengan unsur lain	Memiliki struktur kristal FCC
	Bersifat diamagnetik
	Kelunakan yang tinggi

Berdasarkan Tabel 2.1, 2.2, dan 4.3, maka jenis material *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem dapat ditentukan menggunakan **aluminium atau tembaga** karena kedua material ini mempunyai sifat material yang baik. Terdapat beberapa sifat material tembaga yang lebih baik dari aluminium, namun sifat material keduanya masih memenuhi syarat sebagai material *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem. Untuk parameter perbandingan biaya yang dibutuhkan untuk masing-masing material aluminium dan tembaga tidak dibahas dalam penelitian ini.

4.2.2 Penentuan Bentuk Penampang *Busbar* pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

Berdasarkan dasar teori pada sub bab 2.1.1 yang menguraikan bahwa *busbar* pada gardu luar ruangan adalah kawat pilin yang terbuat dari baja dan aluminium dan digantung pada isolator. Selain itu penentuan bentuk penampang *busbar* dilakukan berdasarkan dasar teori pada sub bab 2.1.2. Dari uraian dasar teori pada sub bab 2.1.2, dapat dibuat Tabel 4.4 tentang perbandingan masing-masing bentuk penampang *busbar* sebagai berikut.

Tabel 4.4 Keuntungan dan Kerugian Bentuk Penampang *Busbar*

Konduktor Padat	Kawat Pilin
<p>Kelebihan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tangguh secara mekanis • Biaya produksi lebih murah 	<p>Kelebihan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lebih fleksibel untuk total luas penampang yang sama • Fleksibilitas mekaniknya mampu menahan pembengkokan dan pembelitan ulang • Fleksibilitas mekaniknya memudahkan dalam distribusi • Semakin banyak jumlah pilinannya maka kawat pilin semakin fleksibel • Untuk ukuran konduktor yang lebih besar, kawat pilin mudah dalam instalasi dan penjaluran karena kawat pilin lebih lentur • Daya tahan lebih untuk pengaplikasiannya • Dapat mengurangi efek kulit karena total luas permukaannya lebih besar daripada konduktor padat yang setara
<p>Kekurangan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurangnya fleksibilitas, hanya digunakan bila fleksibilitas yang dibutuhkan sedikit atau aplikasi yang benar-benar statis • Mudah rusak jika terkena getaran dan gerakan berulang yang mungkin terjadi setelah beberapa waktu 	<p>Kekurangan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan biaya yang lebih banyak

Berdasarkan Tabel 4.4, maka bentuk penampang *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem ditentukan menggunakan **kawat pilin** karena lebih fleksibel, mampu menahan pembengkokan, mudah dalam instalasi dan penjaluran, mudah dalam distribusi, lebih tahan lama, dan mampu mengurangi efek kulit. Meskipun kawat pilin memerlukan biaya lebih banyak namun kelebihan kawat pilin secara mekanis jauh lebih baik daripada konduktor padat.

4.2.3 Penentuan Dimensi Busbar Kawat Pilin pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

Dari Tabel 4.1 diketahui nilai daya aktif masing-masing generator sinkron tiga fasa adalah 5 MW dengan faktor daya 0,8. Daya semu masing-masing generator sinkron tiga fasa dihitung dengan Persamaan 2-3 sebagai berikut.

$$SG = \frac{PG}{\cos \phi} = \frac{5 \text{ MW}}{0,8} = 6,25 \text{ MVA}$$

Total daya sepuluh buah generator sinkron tiga fasa di PLTA Baliem dihitung sebagai berikut.

$$SG_{\text{total}} = 10 \cdot SG = 10 \cdot 6,25 = 62,5 \text{ MVA}$$

Arus nominal pada busbar dihitung dengan Persamaan 2-2 sebagai berikut.

$$I_{n \text{ 3 fasa}} = \frac{S_{3 \text{ fasa}}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL}} = \frac{SG_{\text{total generator}}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL \text{ sekunder transformator}}} = \frac{62,5 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 150 \text{ kV}} = 240,5 \text{ A}$$

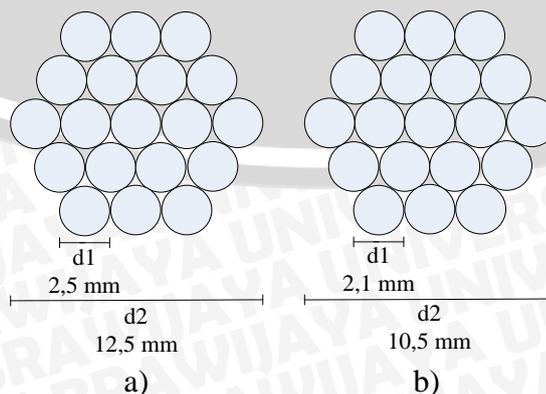
Kemampuan hantar arus busbar dihitung dengan Persamaan 2-1 sebagai berikut.

$$KHA = 1,25 \cdot I_n = 1,25 \cdot 240,5626 = 300,8 \text{ A}$$

Berdasarkan kemampuan hantar arus busbar dan Tabel 2.3 maka dimensi busbar kawat pilin aluminium dan tembaga pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem ditentukan seperti ditampilkan pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.3 berikut.

Tabel 4.5 Dimensi Busbar Kawat Pilin Aluminium dan Tembaga PLTA Baliem

Parameter	Material	
	Aluminium	Tembaga
Jumlah pilin konduktor	19	19
Diameter masing-masing pilin (mm)	2,5	2,1
Diameter total (mm)	12,5	10,5
Luas penampang konduktor (mm ²)	93,27	65,81
Arus kontinu (A)	340	310



Gambar 4.3 Dimensi Busbar Kawat Pilin: a) Aluminium b) Tembaga
d1: diameter masing-masing pilinan kawat; d2: diameter total kawat pilin

4.3 Penentuan Konfigurasi *Busbar* pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

Penentuan konfigurasi *busbar* dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa hal berdasarkan dasar teori pada sub bab 2.2 sebagai berikut.

1. Fleksibilitas pengoperasian sistem dan pembagian sistem

Konfigurasi *busbar* ditentukan berdasarkan pengoperasian sistem dan pembagian sistem dilakukan untuk menghindari kapasitas yang berlebihan.

2. Kemudahan penyesuaian sambungan listrik

Kemudahan penyesuaian operasional *busbar* tergantung pada kemudahan pemasokan atau mentransfer pasokan listrik pada *busbar* untuk masing-masing konfigurasi *busbar*.

3. Keandalan

Konfigurasi *busbar* merupakan salah satu penentu keandalan operasi jaringan. Masing-masing konfigurasi *busbar* mempunyai keandalan berbeda.

4. Kemudahan pemeliharaan

Kemudahan pemeliharaan yang berbeda tergantung konfigurasi *busbar* yang ditentukan, yaitu seberapa besar pemeliharaan mengganggu pengoperasian gardu atau sistem keamanan.

5. Biaya

Pada penelitian ini tidak membahas biaya secara detail. Untuk biaya hanya dibandingkan perkiraan kebutuhan biaya masing-masing konfigurasi *busbar* karena masing-masing konfigurasi *busbar* membutuhkan jumlah komponen yang berbeda-beda.

6. Peran dan pentingnya gardu induk

Konfigurasi *busbar* ditentukan berdasarkan peran dan pentingnya gardu induk dalam sistem daya, tingkat tegangan, dan kapasitas terpasang.

7. Pengembangan gardu induk

Sesuai dengan meningkatnya beban, keandalan gardu dan kemampuan operasional dapat ditingkatkan dengan langkah penambahan fasilitas. Gardu induk yang lebih besar biasanya menggunakan konfigurasi *busbar* yang lebih rumit yang membutuhkan investasi modal dan biaya operasi yang lebih tinggi.

Selain beberapa pertimbangan tersebut penentuan konfigurasi *busbar* juga mempertimbangkan keuntungan dan kerugian masing-masing konfigurasi *busbar* pada Tabel 2.4. Berdasarkan pertimbangan-pertimbangan tersebut maka jenis konfigurasi *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem ditentukan menggunakan **konfigurasi dua bus-satu pemutus daya** dengan analisis sebagai berikut.

1. Fleksibilitas pengoperasian sistem dan pembagian sistem

Konfigurasi dua bus-satu pemutus daya menghubungkan setiap sirkuit ke dua bus, dan ada pemutus daya seri antara bus yang biasanya dioperasikan tertutup yang memungkinkan setiap sirkuit dipasok dari bus manapun atau transfer melalui sakelarnya. Fleksibilitas pergantian masing-masing bus ini tinggi. Jika pemutus daya bus seri dioperasikan terbuka, maka akan menghilangkan keuntungan sistem dan mengubah konfigurasi ini menjadi konfigurasi dua bus tunggal.

2. Kemudahan penyesuaian sambungan listrik

Dengan adanya pemutus daya seri tertutup pada konfigurasi dua bus-satu pemutus daya yang memungkinkan setiap sirkuit dipasok dari bus manapun atau transfer melalui sakelarnya memberikan peningkatan kemudahan penyesuaian operasi dan transfer setiap sirkuit ke bus manapun.

3. Keandalan

Keandalan konfigurasi dua bus-satu pemutus daya sedang karena kegagalan pemutus daya bus seri memisahkan semua cabang pada *busbar* yang terkena dan akan menyebabkan pemadaman seluruh stasiun. Namun kegagalan pada satu bus tidak akan mempengaruhi bus lain sehingga meningkatkan keandalan. Konfigurasi ini paling cocok jika peningkatan keandalan operasi dan transfer beban merupakan hal yang penting.

4. Kemudahan pemeliharaan

Konfigurasi dua bus-satu pemutus daya memberikan beberapa kemudahan dalam pemeliharaan, terutama untuk pemeliharaan bus karena masing-masing bus dapat diisolasi untuk pemeliharaan. Namun pemeliharaan saluran pemutus daya masih memerlukan sakelar dan pemadaman seperti konfigurasi bus tunggal.

5. Biaya

Biaya konfigurasi dua bus-satu pemutus daya sedang karena lebih mahal dari konfigurasi bus tunggal dengan tambahan bus, pemutus daya ekstra untuk

penghubung perangkat pensakelaran, peralatan, rele proteksi yang lebih kompleks, dan material. Selain itu juga dibutuhkan biaya tambahan untuk kebutuhan lahan yang lebih luas karena peralatan ganda dan material tambahan.

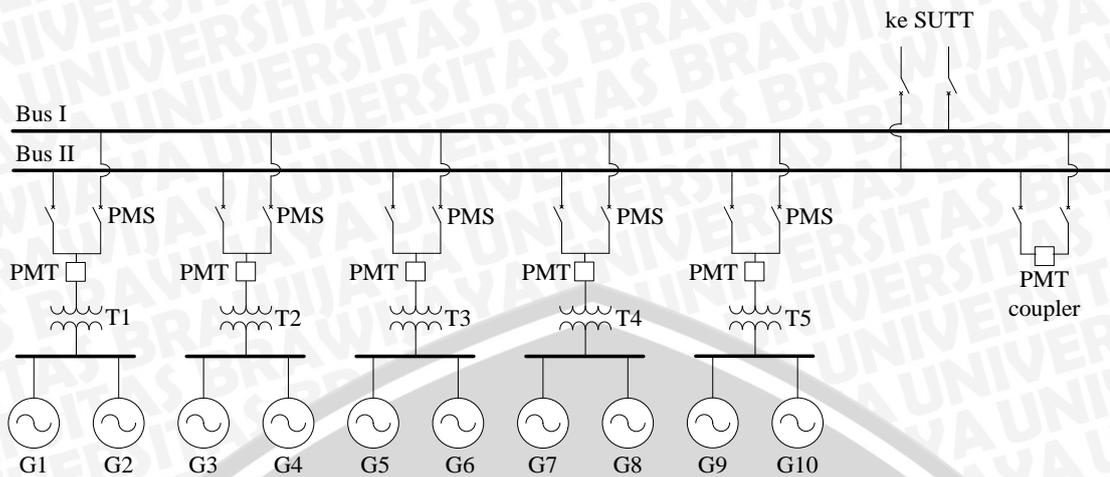
6. Peran dan pentingnya gardu induk

PLTA Baliem direncanakan akan memasok listrik ke distrik-distrik yang ada di wilayah Kabupaten Jayawijaya dan Yahukimo Provinsi Papua. Konfigurasi dua bus-satu pemutus daya dipilih karena sudah memiliki keandalan sedang namun tidak terlalu kompleks dan tidak membutuhkan terlalu banyak komponen karena distribusi komponen ke lokasi gardu induk penaik tegangan PLTA Baliem yang lumayan sulit seperti dipilihnya sepuluh buah generator sinkron 5 MW sebagai generator pembangkit daya dan lima buah transformator 13 MVA daripada satu buah generator sinkron 50 MW dan sebuah transformator 65 MVA. Keandalan yang sedang dibutuhkan karena gardu induk penaik tegangan PLTA Baliem akan memasok pemukiman masyarakat pada distrik-distrik di dua kabupaten Provinsi Papua.

7. Pengembangan gardu induk

Selain konfigurasi bus tunggal, biasanya konfigurasi dua bus-dua pemutus daya juga merupakan tahap awal dari pengembangan gardu induk. Hal ini sesuai dengan gardu induk penaik tegangan PLTA Baliem yang merupakan pembangunan awal dari PLTA Baliem yang memiliki potensi untuk dikembangkan hingga 170 MW di masa yang akan datang. Sungai Baliem sendiri memiliki potensi untuk membangkitkan listrik hingga 880 MW berdasarkan hasil *Hydro Power Potentials Study* (HPPS) yang dilakukan tahun 1999. Pengembangan gardu induk perlu dilakukan bila terjadi peningkatan beban, keandalan gardu, dan kemampuan operasional dengan penambahan fasilitas, salah satunya penggantian konfigurasi *busbar* yang lebih sesuai dan membutuhkan investasi modal dan biaya operasi yang lebih tinggi.

Gambar konfigurasi *busbar* dua bus-satu pemutus daya pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.4 sebagai berikut.



Gambar 4.4 Konfigurasi Busbar Dua Bus-Satu Pemutus Daya pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

4.4 Penghitungan Parameter Tata Letak Busbar

4.4.1 Penghitungan Jarak Aman Minimum Bagian Aktif Busbar

Sesuai Tabel 2.5 untuk sistem 150 kV jarak aman minimum antar bagian aktif fasa ke fasa busbar a dan antar bagian aktif fasa ke bumi N pada latar hubung adalah 1500 mm. Peralatan-peralatan pada latar hubung dipasang pada ketinggian minimal 2440 mm di atas jalan seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.6.

Ketinggian minimum di dalam instalasi dan di luar instalasi dihitung dengan Persamaan 2-4 dan 2-5 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 H &= N + 2440 \text{ mm} \\
 &= 1500 \text{ mm} + 2440 \text{ mm} \\
 &= 3940 \text{ mm} \\
 H' &= N + 4500 \text{ mm} \\
 &= 1500 \text{ mm} + 4500 \text{ mm} \\
 &= 6000 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

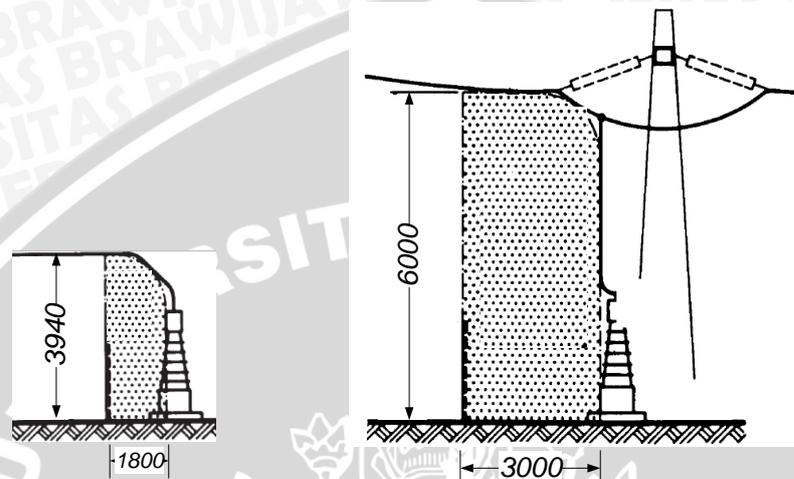
Ketinggian minimum di dalam instalasi ditunjukkan dalam Gambar 4.5a dan 4.6 dan ketinggian minimum di luar instalasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.5b.

Jarak aman minimum antar peralatan di dalam instalasi ditentukan dengan memasang pembatas rantai/tali dan dihitung dengan Persamaan 2-8 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 O_2 &= N + 300 \text{ mm} \\
 &= 1500 \text{ mm} + 300 \text{ mm} \\
 &= 1800 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Jarak aman minimum antar peralatan di luar instalasi ditentukan dengan memasang pembatas kawat jaring dan dihitung dengan Persamaan 2-10 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} E &= N + 1500 \text{ mm} \\ &= 1500 \text{ mm} + 1500 \text{ mm} \\ &= 3000 \text{ mm} \end{aligned}$$



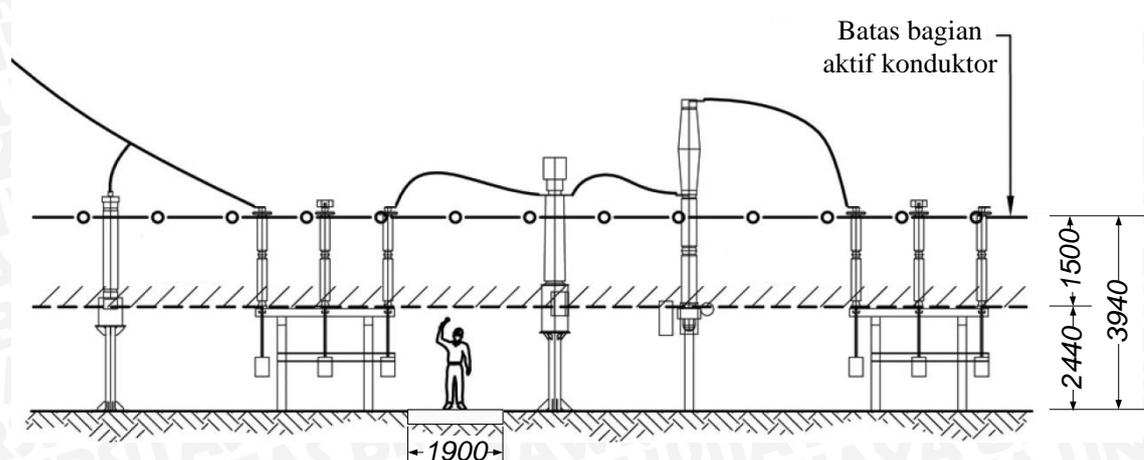
a. Bagian dalam instalasi b. Bagian luar instalasi

Gambar 4.5 Pembatas dan Ketinggian pada Instalasi

Sumber: ABB, 2001:180

Jarak aman minimum antar peralatan di dalam instalasi dengan pembatas rantai/tali seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.5a dan jarak aman minimum antar peralatan di luar instalasi dengan pembatas kawat jaring seperti ditunjukkan dalam Gambar dan 4.5b.

Jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan M_a untuk manusia pada instalasi luar ruangan adalah trotoar dengan lebar 1900 mm seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.6 berikut.

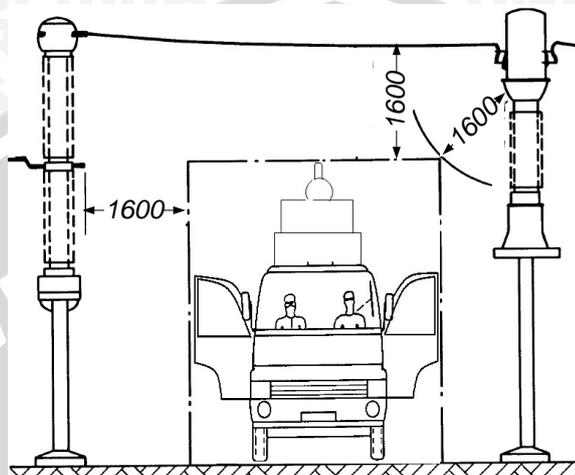


Gambar 4.6 Ketinggian Peralatan-Peralatan Lantar Hubung 150 kV PLTA Baliem

Dimensi dari unit transportasi dalam keadaan pintu terbuka ditentukan 2500 mm. dan dalam keadaan membawa muatan maksimum ditentukan 3000 mm. Jarak aman minimum jalan masuk transportasi T untuk kendaraan seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.7 dihitung dengan Persamaan 2-11 sebagai berikut.

$$T = N + 100 = 1500 \text{ mm} + 100 \text{ mm} = 1600 \text{ mm}$$

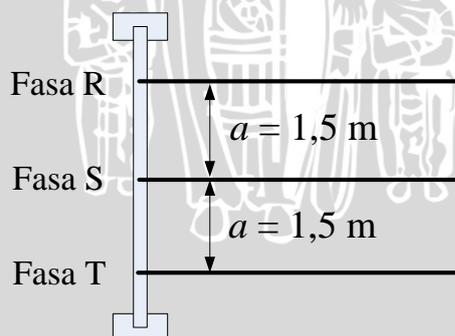
$$T' = T + (2 \cdot 2500 \text{ mm}) = 1600 \text{ mm} + (2 \cdot 2500) = 6600 \text{ mm}$$



Gambar 4.7 Jarak Aman Minimum Transportasi Lantar Hubung Luar Ruangan

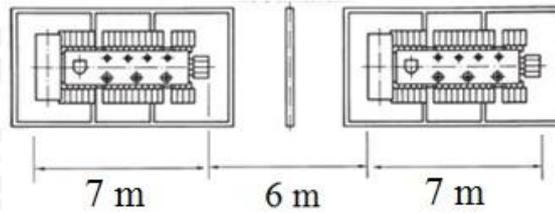
4.4.2 Penghitungan Panjang Busbar

Jarak aman minimum fasa ke fasa saluran ditentukan sesuai Tabel 2.5. Untuk sistem 150 kV jarak aman minimum fasa ke fasa a adalah 1,5 m seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Jarak Aman Fasa ke Fasa Lantar Hubung 150 kV PLTA Baliem

Jarak aman minimum antar saluran terdapat jarak aman minimum antar transformator a_{T-T} yang dipasang dinding perlindungan kebakaran sesuai Tabel 2.7. Untuk sistem 13 MVA jarak aman minimum antar transformator ditentukan adalah 6 m. Jarak yang disediakan untuk panjang transformator ditentukan 7 m. Jarak aman minimum antar saluran seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.9 berikut.



Gambar 4.9 Jarak Aman Antar Transformator Latar Hubung 150 kV PLTA Baliem

Jarak masing-masing saluran l_s dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} l_s &= a_{T-T} + l_T \\ &= 6 \text{ m} + 7 \text{ m} \\ &= 13 \text{ m} \end{aligned}$$

Jarak gawang l ditentukan terdiri dari dua saluran. Jarak masing-masing saluran l_s dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} l &= 2 \times l_s \\ &= 2 \times 13 \text{ m} \\ &= 26 \text{ m} \end{aligned}$$

Tinggi rantai isolator ditentukan 146 mm. Jumlah rantai isolator ditentukan sesuai dengan Tabel 2.6. Untuk sistem 150 kV jumlah rantai isolator adalah 11 rantai. Panjang isolator rantai l_i dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} l_i &= 11 \times 146 \text{ mm} \\ &= 1606 \text{ mm} \\ &= 1,6 \text{ m} \end{aligned}$$

Panjang busbar l_c dihitung dengan Persamaan 2-12 sebagai berikut.

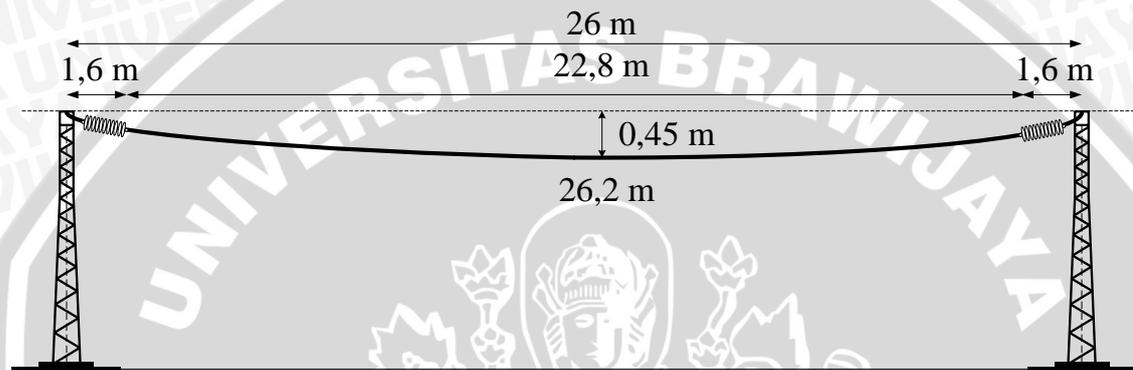
$$\begin{aligned} l &= l_c + 2l_i \\ l_c &= l - 2l_i \\ l_c &= 26 \text{ m} - 2(1,6 \text{ m}) \\ &= 26 \text{ m} - 3,2 \text{ m} \\ &= 22,8 \text{ m} \end{aligned}$$

Andongan busbar terbesar a_k pada latar hubung 150 kV PLTA Baliem pada suhu busbar $+80^\circ\text{C}$ dengan nilai tegangan 150 kV, panjang busbar dan isolator rantai 26 m, dan luas penampang busbar aluminium $93,27 \text{ mm}^2$ dan tembaga $65,81 \text{ mm}^2$ ditentukan dengan Gambar 2.12 kondisi nomor 3 yaitu 0,45 m.

Panjang uluran busbar l_u setelah mempertimbangkan andongan maksimum busbar a_k dihitung dengan Persamaan 2-13 berikut.

$$\begin{aligned} l_u &= l + \frac{8 \cdot (a_k)^2}{3 \cdot l} \\ &= 26 + \frac{8 \cdot (0,45)^2}{3 \cdot 26} \\ &= 26,02 \text{ m} \end{aligned}$$

Gambar l_c , l_i , l , dan l_u busbar pada latar hubung 150 kV PLTA Baliem seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Panjang Busbar dengan Andongan

4.5 Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa Busbar pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

4.5.1 Penentuan Nilai Dasar

Nilai dasar yang ditentukan adalah tegangan dasar dan daya dasar. Tegangan dasar (kV dasar) ditentukan 11 kV yang merupakan tegangan generator dan tegangan pada sisi primer transformator pada PLTA Baliem dan daya dasar (MVA dasar) ditentukan 13 MVA yang merupakan kapasitas daya transformator pada PLTA Baliem.

4.5.2 Penghitungan Impedansi Urutan Positif Generator Sinkron

Dari perhitungan didapatkan daya generator tiga fasa kurang dari 100 MVA, oleh karena itu maka nilai R dihitung dengan Persamaan 2-41 sebagai berikut.

$$R = 0,07 \cdot X_d''$$

Dari Tabel 2.8, untuk generator kutub menonjol dengan belitan peredam, nilai reaktansi urutan positifnya terletak dalam rentang 12%-30%. Reaktansi urutan positif generator dihitung dengan mengambil nilai tengahnya sebagai berikut.

$$X_d'' = \frac{(12\%+30\%)}{2} = 21\% = 0,21 \text{ pu}$$

Nilai R dihitung dengan Persamaan 2-41 sebagai berikut.

$$R = 0,07 \cdot X_d'' = 0,07 \cdot 0,21 = 0,0147 \text{ pu}$$

Impedansi urutan positif generator diwakili reaktansi urutan positif generator dengan mengabaikan nilai R yang sangat kecil sesuai dengan Persamaan 2-40 berikut.

$$Z = R + jX_d'' = 0 + j0,21 = j0,21 \text{ pu}$$

Nilai impedansi tersebut masih dalam kuantitas per-unit sesuai dengan tegangan dan daya generator, yaitu 11 kV dan 5 MW. Nilai impedansi urutan generator dalam satuan per-unit tersebut diubah ke dasar baru dengan tegangan dasar 11 kV dan daya dasar 13 MVA yang sudah ditentukan sebelumnya. Impedansi urutan positif generator dihitung dengan Persamaan 2-45 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Z_1 G (\text{pu}) &= Z_{\text{diberikan}} (\text{pu}) \cdot \left(\frac{kV_{\text{diberikan}} \text{ dasar}}{kV_{\text{baru}} \text{ dasar}} \right)^2 \cdot \left(\frac{MVA_{\text{baru}} \text{ dasar}}{kVA_{\text{diberikan}} \text{ dasar}} \right) \\ &= Z_{\text{diberikan}} (\text{pu}) \cdot \left(\frac{kV_{\text{diberikan}} \text{ dasar}}{kV_{\text{baru}} \text{ dasar}} \right)^2 \cdot \left(\frac{MVA_{\text{baru}} \text{ dasar}}{(MW_{\text{lama}} \text{ dasar} / \cos \phi)} \right) \\ &= j0,21 \cdot \frac{11 \text{ kV}^2}{11 \text{ kV}^2} \cdot \frac{13 \text{ MVA}}{(5 \text{ MW} / 0,8)} = j0,4368 \text{ pu} \end{aligned}$$

4.5.3 Penghitungan Impedansi Urutan Positif Transformator

Dari Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa tegangan teraan sisi sekunder transformator adalah 150 kV dan daya teraan transformator adalah 13 MVA. Kemudian dengan Tabel 2.9 dan Tabel 2.10 ditentukan jatuh tegangan impedansi $U_k\%$ adalah 12% dan jatuh tegangan ohmik $UR\%$ adalah 0,6%.

$$Z_1 = U_k\% = 12\% = 0,12 \text{ pu}$$

$$R_1 = UR\% = 0,6\% = 0,006 \text{ pu}$$

Dengan mengabaikan nilai R yang sangat kecil, maka impedansi urutan positif transformator diwakili oleh reaktansi urutan positif transformator dan dihitung menggunakan Persamaan 2-42 sebagai berikut.

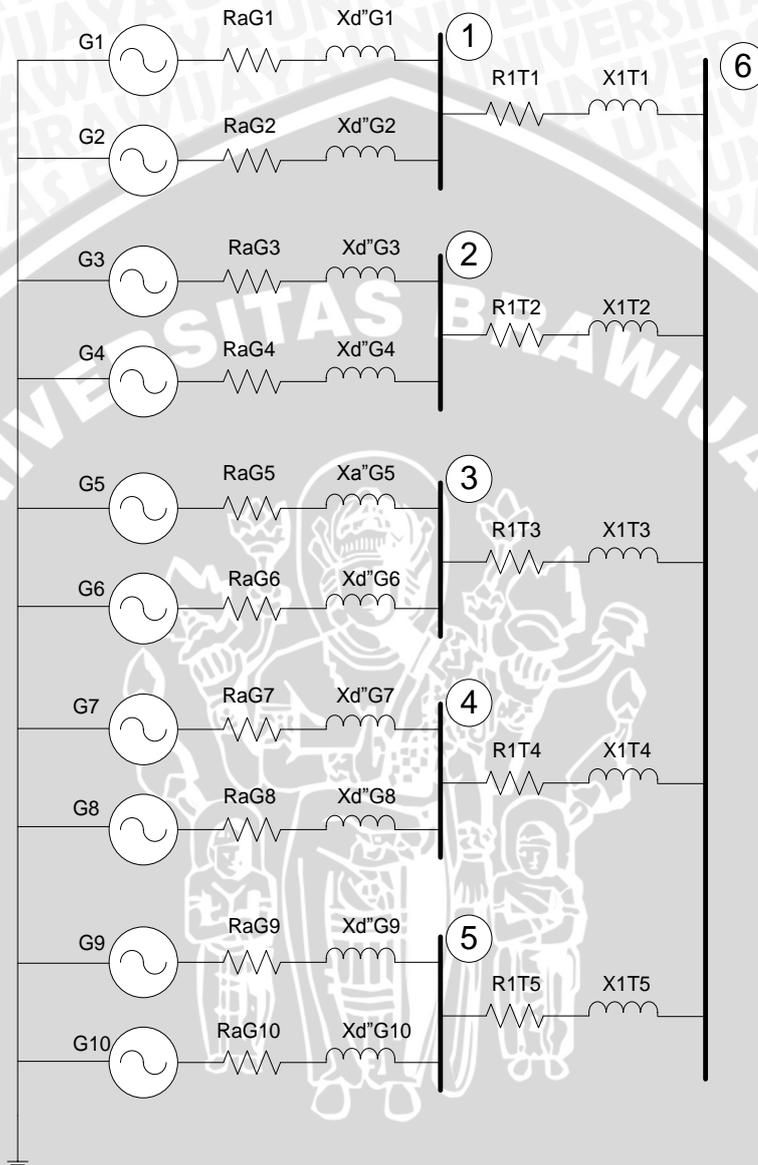
$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = \sqrt{0,12^2 - 0,006^2} = 0,1198 \text{ pu}$$

$$Z_1 T = R_1 + jX_1 = 0 + j0,1198 = j0,1198 \text{ pu}$$

Karena tegangan dan daya transformator sama dengan tegangan dasar dan daya dasar yang sudah ditentukan, maka tidak perlu dilakukan pengubahan nilai dasar.

4.5.4 Penghitungan Impedansi Urutan Positif Ekivalen Jaringan

Impedansi urutan positif ekivalen jaringan dihitung dengan terlebih dahulu menggambar hubungan semua generator dan transformator seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Rangkaian Impedansi Urutan Positif Total

Setelah menggambar hubungan semua generator dan transformator, kemudian membuat matriks Y_{bus} dari gambar tersebut dengan menggunakan Persamaan 2-38. Karena nilai impedansi urutan positif masing-masing generator dan transformator sama, maka nilai admitansi masing-masing bus adalah sebagai berikut.

$$Y_{11} = Y_{22} = Y_{33} = Y_{44} = Y_{55} = y1S1 + y1S2 + y1T1$$

$$Y_{16} = Y_{61} = Y_{26} = Y_{62} = Y_{36} = Y_{63} = Y_{46} = Y_{64} = Y_{56} = Y_{65} = -y1T1$$

$$Y_{66} = 5 \times y1T1$$

Setelah membuat matriks Y_{bus} impedansi positif ekivalen jaringan dihitung dengan membalikkan matriks Y_{bus} sebagai berikut dengan menggunakan Persamaan 2-39 sebagai berikut.

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1}$$

Analisis arus hubung singkat tiga fasa dilakukan pada busbar yang akan dirancang yaitu bus 6 maka $Z_1 = Z_{66} = j0,0676$ pu.

4.5.5 Penghitungan Arus Hubung Singkat Tiga Fasa

Dalam menghitung arus hubung singkat tiga fasa perlu diketahui nilai tegangan dasar dalam satuan per-unit. Tegangan dasar dalam satuan per-unit bernilai 1 karena dibandingkan dengan nilainya sendiri yaitu 11 kV. Arus hubung singkat tiga fasa dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-37 sebagai berikut.

$$I_{f\ 3\ fasa} \text{ (pu)} = \frac{V_f}{Z_1} = \frac{1}{j0,0676} = -j14,782 \text{ pu}$$

Kemudian setelah didapatkan nilai arus hubung singkat dalam satuan per-unit, arus hubung singkat dikonversikan ke satuan ampere menggunakan Persamaan 2-43 dengan MVA_{dasar} 13 MVA dan V_{dasar} 11 kV. I_{dasar} dapat dihitung sebagai berikut.

$$I_{dasar} = \frac{MVA_{dasar}}{\sqrt{3} \cdot kV_{dasar}} = \frac{13 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 11 \text{ kV}} = 682,323 \text{ A}$$

Arus hubung singkat tiga fasa dalam satuan ampere dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} I_{f\ 3\ fasa} \text{ (A)} &= I_{f\ 3\ fasa} \text{ (pu)} \cdot I_{dasar} \\ &= -j14,782 \text{ pu} \cdot 682,323 \text{ A} \\ &= -j10086 \text{ A} = 10086 \angle -90,05^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa arus hubung singkat tiga fasa busbar pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem adalah sebesar $10086 \angle -90,05^\circ \text{ A}$.

4.6 Busbar saat Hubung Singkat

4.6.1 Andongan Maksimum Busbar saat Hubung Singkat

Berat busbar m' ditentukan dengan Tabel 2.3 dan dengan beban tambahan. Nilai m' untuk masing-masing material aluminium dan tembaga adalah sebagai berikut.

$$m' \text{ al} = 0,256 + 1,431 = 1,687 \text{ kg/m}$$

$$m' \text{ cu} = 0,596 + 1,431 = 2,027 \text{ kg/m}$$

Komponen horizontal tarikan *busbar* statis F_{st} untuk suhu minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bernilai 12126,4 N dan untuk suhu operasional maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ bernilai 11370,4 N.

Andongan maksimum *busbar* di tengah rentang b_c pada saat hubung singkat untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dihitung dengan Persamaan 2-28 berikut.

$$b_{c\text{ al } - 20\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{m'_{\text{al}} g_n l^2}{8F_{st-20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = \frac{1,687 \cdot 9,80665 \cdot (26)^2}{8 \cdot 12126,4} = 0,11\text{ m}$$

$$b_{c\text{ al } + 60\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{m'_{\text{al}} g_n l^2}{8F_{st+60\text{ }^{\circ}\text{C}}} = \frac{1,687 \cdot 9,80665 \cdot (26)^2}{8 \cdot 11370,4} = 0,12\text{ m}$$

$$b_{c\text{ cu } - 20\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{m'_{\text{cu}} g_n l^2}{8F_{st-20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = \frac{2,027 \cdot 9,80665 \cdot (26)^2}{8 \cdot 12126,4} = 0,14\text{ m}$$

$$b_{c\text{ cu } + 60\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{m'_{\text{cu}} g_n l^2}{8F_{st+60\text{ }^{\circ}\text{C}}} = \frac{2,027 \cdot 9,80665 \cdot (26)^2}{8 \cdot 11370,4} = 0,15\text{ m}$$

Nilai maksimum andongan *busbar* di tengah rentang b_c saat hubung singkat pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem untuk masing-masing material aluminium dan tembaga terletak pada suhu operasional maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sebagai berikut.

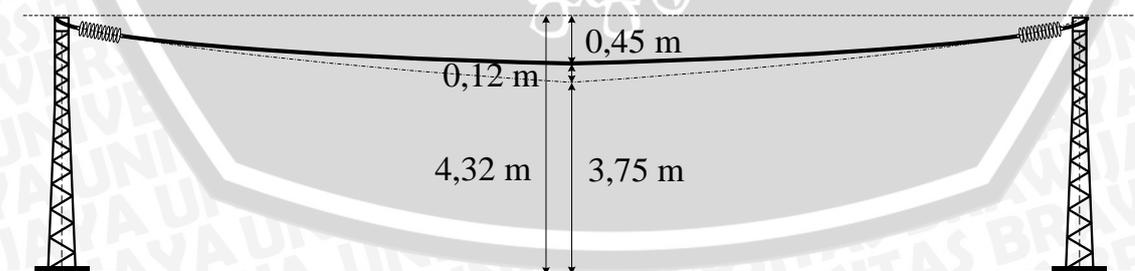
$$b_{c\text{ al}} = 0,12\text{ m}$$

$$b_{c\text{ cu}} = 0,15\text{ m}$$

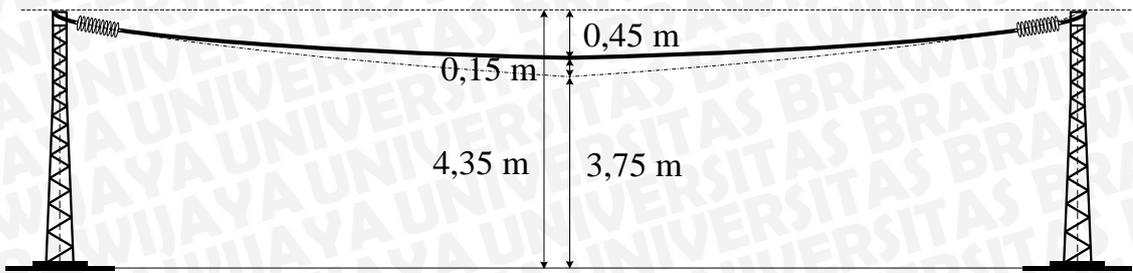
Ketinggian minimum pemasangan *busbar* H_b untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dengan mempertimbangkan andongan maksimum *busbar* di tengah rentang b_c pada saat hubung singkat ditunjukkan dalam Gambar 4.12 dan 4.13 yang dihitung dengan Persamaan 2-29 berikut.

$$H_{b\text{ al}} = H + a_k + b_{c\text{ al}} = 3,75 + 0,45 + 0,12 = 4,32\text{ m}$$

$$H_{b\text{ cu}} = H + a_k + b_{c\text{ cu}} = 3,75 + 0,45 + 0,15 = 4,35\text{ m}$$



Gambar 4.12 Ketinggian Minimum Pemasangan *Busbar* untuk Material Aluminium



Gambar 4.13 Ketinggian Minimum Pemasangan *Busbar* untuk Material Tembaga

4.6.2 Gaya Tarik *Busbar* saat Hubung Singkat

Nilai rms arus hubung singkat simetris awal I''_{k3} sama dengan arus hubung singkat tiga fasa *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem. I''_{k2} dihitung dengan Persamaan 2-21 berikut.

$$I''_{k2} = 0,75 \cdot I''_{k3} = 0,75 \cdot (10086 \text{ A})^2 = 76,3(\text{kA})^2$$

Kerapatan gaya elektrodinamik per satuan panjang F' ketika *busbar* terkena hubung singkat dihitung dengan Persamaan 2-20 sebagai berikut.

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I''_{k2}}{a} \cdot \frac{l_c}{l} = 0,2 \text{ N/kA}^2 \cdot \frac{76,3 \text{ kA}^2}{1,5 \text{ m}} \cdot \frac{22,8 \text{ m}}{26 \text{ m}} = 8,92 \text{ N/m}$$

Rasio gaya r untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dihitung dengan Persamaan 2-19 sebagai berikut.

$$r_{\text{al}} = \frac{F'}{g_n m'_{\text{al}}} = \frac{8,92}{9,80665 \cdot 1,687} = 0,54$$

$$r_{\text{cu}} = \frac{F'}{g_n m'_{\text{cu}}} = \frac{8,92}{9,80665 \cdot 2,027} = 0,45$$

Arah gaya resultan pada *busbar* δ_1 untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dihitung dengan Persamaan 2-23 sebagai berikut.

$$\delta_{1 \text{ al}} = \arctan r_{\text{al}} = \arctan 0,54 = 28,4^\circ$$

$$\delta_{1 \text{ cu}} = \arctan r_{\text{cu}} = \arctan 0,45 = 24,2^\circ$$

Periode dari osilasi *busbar* T untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum -20°C dan maksimum $+60^\circ \text{C}$ dihitung dengan Persamaan 2-17 sebagai berikut.

$$T_{\text{al}} - 20^\circ \text{C} = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_{\text{cal}} - 20^\circ \text{C}}{g_n}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{0,8 \frac{0,11}{9,80665}} = 0,61 \text{ s}$$

$$T_{\text{al}} + 60^\circ \text{C} = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_{\text{cal}} + 60^\circ \text{C}}{g_n}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{0,8 \frac{0,12}{9,80665}} = 0,63 \text{ s}$$

$$T_{\text{cu}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_{\text{c cu}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}}{g_n}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{0,8 \frac{0,14}{9,80665}} = 0,67 \text{ s}$$

$$T_{\text{cu}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C} = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_{\text{c cu}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}}{g_n}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{0,8 \frac{0,15}{9,80665}} = 0,69 \text{ s}$$

Durasi hubung singkat relevan T_{k11} untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dihitung dengan Persamaan 2-16 sebagai berikut.

$$T_{k11 \text{ al}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,4 \cdot T_{\text{al}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,4 \cdot 0,61 \text{ s} = 0,24 \text{ s}$$

$$T_{k11 \text{ al}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,4 \cdot T_{\text{al}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,4 \cdot 0,63 \text{ s} = 0,25 \text{ s}$$

$$T_{k11 \text{ cu}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,4 \cdot T_{\text{cu}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,4 \cdot 0,67 \text{ s} = 0,27 \text{ s}$$

$$T_{k11 \text{ cu}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,4 \cdot T_{\text{cu}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,4 \cdot 0,69 \text{ s} = 0,28 \text{ s}$$

Periode resultan dari osilasi busbar T_{res} untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dihitung dengan Persamaan 2-18 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} T_{\text{res al}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} &= \frac{T_{\text{al}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt[4]{1+r_{\text{al}}^2 \left[1 - \frac{\pi^2 (\delta_{1 \text{ al}})^2}{64 \left(\frac{90^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]}} \\ &= \frac{0,61}{\sqrt[4]{1+(0,54)^2 \left[1 - \frac{(3,14)^2 (28,4^\circ)^2}{64 \left(\frac{90^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]}} \\ &= 0,58 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{res al}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C} &= \frac{T_{\text{al}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt[4]{1+r_{\text{al}}^2 \left[1 - \frac{\pi^2 (\delta_{1 \text{ al}})^2}{64 \left(\frac{90^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]}} \\ &= \frac{0,63}{\sqrt[4]{1+(0,54)^2 \left[1 - \frac{(3,14)^2 (28,4^\circ)^2}{64 \left(\frac{90^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]}} \\ &= 0,6 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{res cu}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C} &= \frac{T_{\text{cu}} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt[4]{1+r_{\text{cu}}^2 \left[1 - \frac{\pi^2 (\delta_{1 \text{ cu}})^2}{64 \left(\frac{90^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]}} \\ &= \frac{0,67}{\sqrt[4]{1+(0,45)^2 \left[1 - \frac{(3,14)^2 (24,2^\circ)^2}{64 \left(\frac{90^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]}} \\ &= 0,64 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{res cu}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C} &= \frac{T_{\text{cu}} + 60 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt[4]{1+r_{\text{cu}}^2 \left[1 - \frac{\pi^2 (\delta_{1 \text{ cu}})^2}{64 \left(\frac{90^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]}} \\ &= \frac{0,69}{\sqrt[4]{1+(0,45)^2 \left[1 - \frac{(3,14)^2 (24,2^\circ)^2}{64 \left(\frac{90^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]}} \\ &= 0,67 \text{ s} \end{aligned}$$

$\frac{T_{res}}{4}$ untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dihitung sebagai berikut.

$$\frac{T_{res\ al-20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} = \frac{0,58}{4} = 0,14\text{ s}$$

$$\frac{T_{res\ al+60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} = \frac{0,6}{4} = 0,15\text{ s}$$

$$\frac{T_{res\ cu-20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} = \frac{0,64}{4} = 0,16\text{ s}$$

$$\frac{T_{res\ cu+60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} = \frac{0,67}{4} = 0,17\text{ s}$$

Perbandingan T_{k11} dan $\frac{T_{res}}{4}$ adalah $T_{k11} \geq \frac{T_{res}}{4}$, maka parameter beban ϕ untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dihitung dengan Persamaan 2-15 berikut.

$$\phi_{al} = 3(\sqrt{1 + r_{al}^2} - 1) = 3(\sqrt{1 + (0,54)^2} - 1) = 0,41$$

$$\phi_{cu} = 3(\sqrt{1 + r_{cu}^2} - 1) = 3(\sqrt{1 + (0,45)^2} - 1) = 0,29$$

Modulus Young E untuk masing-masing material aluminium dan tembaga sesuai Tabel 2.3 dan jumlah pilin sesuai sub bab 4.2.3 adalah sebagai berikut.

$$E_{al} = 57\text{ kN/mm}^2$$

$$E_{cu} = 105\text{ kN/mm}^2$$

$\frac{F_{st}}{A}$ untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dihitung sebagai berikut.

$$\frac{F_{st-20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{A_{al}} = \frac{12126,4}{93,27} = 130\text{ N/mm}^2$$

$$\frac{F_{st+60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{A_{al}} = \frac{11370,4}{93,27} = 121,9\text{ N/mm}^2$$

$$\frac{F_{st-20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{A_{cu}} = \frac{12126,4}{65,81} = 184,3\text{ N/mm}^2$$

$$\frac{F_{st+60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{A_{cu}} = \frac{11370,4}{65,81} = 172,8\text{ N/mm}^2$$

Perbandingan $\frac{F_{st}}{A}$ dan σ_{fin} adalah $\frac{F_{st}}{A} > \sigma_{fin}$ maka modulus elatisitas efektif E_s untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dihitung dengan Persamaan 2-26 berikut.

$$E_{s\ al-20\text{ }^{\circ}\text{C}} = E_{s\ al+60\text{ }^{\circ}\text{C}} = E_{al} = 57\text{ kN/mm}^2 = 57000\text{ N/mm}^2$$

$$E_{s\ cu-20\text{ }^{\circ}\text{C}} = E_{s\ cu+60\text{ }^{\circ}\text{C}} = E_{cu} = 105\text{ kN/mm}^2 = 105000\text{ N/mm}^2$$

Standar kekakuan N untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dihitung dengan Persamaan 2-25 sebagai berikut.

$$N_{al} = \frac{1}{sl} + \frac{1}{E_{s al} A_{al}} = \frac{1}{500 \cdot 26000} + \frac{1}{57000 \cdot 93,27} = 265 \cdot 10^{-9} / N$$

$$N_{cu} = \frac{1}{sl} + \frac{1}{E_{s cu} A_{cu}} = \frac{1}{500 \cdot 26000} + \frac{1}{105000 \cdot 65,81} = 221,6 \cdot 10^{-9} / N$$

Faktor tekanan busbar utama ζ untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20^\circ C$ dan maksimum $+60^\circ C$ dihitung dengan Persamaan 2-24 sebagai berikut.

$$\zeta_{al} - 20^\circ C = \frac{(g_n m'_{al} l)^2}{24 (F_{st} - 20^\circ C)^3 N} = \frac{(9,80665 \cdot 1,687 \cdot 26)^2}{24 \cdot (12126,4)^3 \cdot 265 \cdot 10^{-9}} = 0,02$$

$$\zeta_{al} + 60^\circ C = \frac{(g_n m'_{al} l)^2}{24 (F_{st} + 60^\circ C)^3 N} = \frac{(9,80665 \cdot 1,687 \cdot 26)^2}{24 \cdot (11370,4)^3 \cdot 265 \cdot 10^{-9}} = 0,02$$

$$\zeta_{cu} - 20^\circ C = \frac{(g_n m'_{cu} l)^2}{24 (F_{st} - 20^\circ C)^3 N} = \frac{(9,80665 \cdot 2,027 \cdot 26)^2}{24 \cdot (12126,4)^3 \cdot 221,6 \cdot 10^{-9}} = 0,03$$

$$\zeta_{cu} + 60^\circ C = \frac{(g_n m'_{cu} l)^2}{24 (F_{st} + 60^\circ C)^3 N} = \frac{(9,80665 \cdot 2,027 \cdot 26)^2}{24 \cdot (11370,4)^3 \cdot 221,6 \cdot 10^{-9}} = 0,04$$

Faktor reaksi rentang ψ ditentukan menggunakan Gambar 2.18 untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20^\circ C$ dan maksimum $+60^\circ C$ sebagai berikut.

$$\psi_{al} - 20^\circ C = \psi_{al} + 60^\circ C = 0,16$$

$$\psi_{cu} - 20^\circ C = \psi_{cu} + 60^\circ C = 0,25$$

Gaya tarik hubung singkat yang dihasilkan F_t selama ayunan busbar untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20^\circ C$ dan maksimum $+60^\circ C$ dihitung dengan Persamaan 2-14 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} F_{tal} - 20^\circ C &= F_{st} - 20^\circ C \cdot (1 + \varphi_{al} \cdot \psi_{al} - 20^\circ C) \\ &= 12126,4 \cdot (1 + 0,41 \cdot 0,16) \\ &= 12918,7 N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{tal} + 60^\circ C &= F_{st} + 60^\circ C \cdot (1 + \varphi_{al} \cdot \psi_{al} + 60^\circ C) \\ &= 11370,4 \cdot (1 + 0,41 \cdot 0,16) \\ &= 12113,3 N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{tcu} - 20^\circ C &= F_{st} - 20^\circ C \cdot (1 + \varphi_{al} \cdot \psi_{cu} - 20^\circ C) \\ &= 12126,4 \cdot (1 + 0,29 \cdot 0,25) \\ &= 13000,2 N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{t\text{cu}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C} &= F_{st} + 60\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (1 + \varphi_{al} \cdot \psi_{cu} + 60\text{ }^{\circ}\text{C}) \\
 &= 11370,4 \cdot (1 + 0,29 \cdot 0,25) \\
 &= 12190\text{ N}
 \end{aligned}$$

Nilai maksimum gaya tarik hubung singkat F_t busbar pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem untuk masing-masing material aluminium dan tembaga terletak pada suhu operasional minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sebagai berikut.

$$F_{t\text{al}} = 12918,7\text{ N}$$

$$F_{t\text{cu}} = 13000,2\text{ N}$$

4.6.3 Gaya Jatuh Busbar saat Hubung Singkat

$\frac{T_{k11}}{T}$ dihitung sebagai berikut.

$$T_{k11} = 0,4 \cdot T \Rightarrow \frac{T_{k11}}{T} = 0,4$$

Sudut ayunan maksimum δ_m untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ditentukan berdasarkan Gambar 2.19 sebagai berikut.

$$\delta_{m\text{al}} = 63^{\circ}$$

$$\delta_{m\text{cu}} = 61^{\circ}$$

Gaya jatuh tidak perlu dipertimbangkan karena $r \leq 0,6$ dan $\delta_m < 70^{\circ}$.

4.6.4 Gaya pada Penyangga saat Hubung Singkat

Gaya mekanis pada tiang ujung adalah setengah dari gaya mekanis penghantar. Gaya tarik hubung singkat F_t busbar pada tiang ujung pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem untuk masing-masing material aluminium dan tembaga sebagai berikut.

$$F_{t\text{al tiang ujung}} = \frac{12918,7}{2} = 6459,35\text{ N}$$

$$F_{t\text{cu tiang ujung}} = \frac{13000,2}{2} = 6500,1\text{ N}$$

Gaya mekanis pada tiang tengah dengan deviasi sudut lintasan 0° tidak menerima gaya mekanis akibat massa penghantar dengan panjang yang sama karena gaya tersebut saling menghilangkan pada jarak gawang yang berdampingan. Namun tiang tengah pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem harus mampu menahan gaya tarik hubung singkat F_t busbar berlawanan yang saling menghilangkan tersebut. Pada latar hubung 150 kV PLTA Baliem tidak terdapat tiang sudut.

4.6.5 Ayunan Maksimum *Busbar* saat Hubung Singkat

Perluasan *busbar* elastis ε_{ela} untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dihitung dengan Persamaan 2-34 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ela al } -20\text{ }^{\circ}\text{C}} &= N_{\text{al}}((F_t - 20\text{ }^{\circ}\text{C}) - (F_{\text{st}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C})) \\ &= 265 \cdot 10^{-9} \cdot (12918,7 - 12126,4) \\ &= 2,1 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ela al } +60\text{ }^{\circ}\text{C}} &= N_{\text{al}}(F_t + 60\text{ }^{\circ}\text{C} - F_{\text{st}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ &= 265 \cdot 10^{-9} \cdot (12113,3 - 11370,4) \\ &= 2 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ela cu } -20\text{ }^{\circ}\text{C}} &= N_{\text{cu}}(F_t - 20\text{ }^{\circ}\text{C} - F_{\text{st}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}) \\ &= 221,6 \cdot 10^{-9} \cdot (13000,2 - 12126,4) \\ &= 1,9 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ela cu } +60\text{ }^{\circ}\text{C}} &= N_{\text{cu}}(F_t - F_{\text{st}}) \\ &= 221,6 \cdot 10^{-9} \cdot (12190 - 11370,4) \\ &= 1,8 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

Perbandingan $T_{\text{k}11}$ dan $\frac{T_{\text{res}}}{4}$ adalah $T_{\text{k}11} \geq \frac{T_{\text{res}}}{4}$ maka perluasan *busbar* panas ε_{th} untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan maksimum $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dihitung dengan Persamaan 2-33 berikut.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{th al } -20\text{ }^{\circ}\text{C}} &= c_{\text{th al}} \cdot \left(\frac{I_{\text{k}3}}{A_{\text{al}}}\right)^2 \cdot \frac{T_{\text{res al } -20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} \\ &= 0,27 \cdot \left(\frac{10086}{93,27}\right)^2 \cdot \frac{1,14 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4}{4 \text{ A}^2\text{s}} \\ &= 4,6 \cdot 10^{-22} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{th al } +60\text{ }^{\circ}\text{C}} &= c_{\text{th al}} \cdot \left(\frac{I_{\text{k}3}}{A_{\text{al}}}\right)^2 \cdot \frac{T_{\text{res al } +60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} \\ &= 0,27 \cdot \left(\frac{10086}{93,27}\right)^2 \cdot \frac{1,15 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4}{4 \text{ A}^2\text{s}} \\ &= 4,7 \cdot 10^{-22} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{th cu}} - 20^\circ\text{C} &= c_{\text{th cu}} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{A_{\text{cu}}}\right)^2 \cdot \frac{T_{\text{res cu}} - 20^\circ\text{C}}{4} \\ &= 0,088 \cdot \left(\frac{10086}{65,81}\right)^2 \cdot \frac{1,16}{4} \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}} \\ &= 3,3 \cdot 10^{-22} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{th cu}} + 60^\circ\text{C} &= c_{\text{th cu}} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{A_{\text{cu}}}\right)^2 \cdot \frac{T_{\text{res cu}} + 60^\circ\text{C}}{4} \\ &= 0,088 \cdot \left(\frac{10086}{65,81}\right)^2 \cdot \frac{1,17}{4} \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}} \\ &= 3,4 \cdot 10^{-22} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}\end{aligned}$$

Karena $r_{\text{al}} \leq 0,8$ dan $r_{\text{cu}} \leq 0,8$, maka faktor C_F untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum -20°C dan maksimum $+60^\circ\text{C}$ dapat ditentukan dengan Persamaan 2-31 sebagai berikut.

$$C_{F \text{ al}} = C_{F \text{ cu}} = 1,05$$

Faktor C_D untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum -20°C dan maksimum $+60^\circ\text{C}$ dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-32 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}C_{D \text{ al}} - 20^\circ\text{C} &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c \text{ al}} - 20^\circ\text{C}}\right)^2 (\varepsilon_{\text{ela al}} - 20^\circ\text{C} + \varepsilon_{\text{th al}} - 20^\circ\text{C})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{26}{0,12}\right)^2 (2,1 \cdot 10^{-4} + 4,6 \cdot 10^{-22})} = 3,7\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{D \text{ al}} + 60^\circ\text{C} &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c \text{ al}} + 60^\circ\text{C}}\right)^2 (\varepsilon_{\text{ela al}} + 60^\circ\text{C} + \varepsilon_{\text{th al}} + 60^\circ\text{C})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{26}{0,13}\right)^2 (2 \cdot 10^{-4} + 4,7 \cdot 10^{-22})} = 3,5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{D \text{ cu}} - 20^\circ\text{C} &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c \text{ cu}} - 20^\circ\text{C}}\right)^2 (\varepsilon_{\text{ela cu}} - 20^\circ\text{C} + \varepsilon_{\text{th cu}} - 20^\circ\text{C})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{26}{0,14}\right)^2 (1,9 \cdot 10^{-4} + 3,3 \cdot 10^{-22})} = 2,8\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{D \text{ cu}} + 60^\circ\text{C} &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c \text{ cu}} + 60^\circ\text{C}}\right)^2 (\varepsilon_{\text{ela cu}} + 60^\circ\text{C} + \varepsilon_{\text{th cu}} + 60^\circ\text{C})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{26}{0,15}\right)^2 (1,8 \cdot 10^{-4} + 3,4 \cdot 10^{-22})} = 2,7\end{aligned}$$

Karena $\delta_m \geq \delta_1$, maka ayunan maksimum busbar di tengah rentang b_h saat hubung singkat untuk masing-masing material aluminium dan tembaga untuk suhu operasional minimum $-20\text{ }^\circ\text{C}$ dan maksimum $+60\text{ }^\circ\text{C}$ dihitung dengan Persamaan 2-30 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} b_{h\text{ al}} - 20\text{ }^\circ\text{C} &= (C_{F\text{ al}} - 20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (C_{D\text{ al}} - 20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (b_{c\text{ al}} - 20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot \sin \delta_{1\text{ al}} \\ &= 1,05 \cdot 3,7 \cdot 0,11 \cdot \sin 28,4^\circ \\ &= 0,43\text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{h\text{ al}} + 60\text{ }^\circ\text{C} &= (C_{F\text{ al}} + 60\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (C_{D\text{ al}} + 60\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (b_{c\text{ al}} - 20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot \sin \delta_{1\text{ al}} \\ &= 1,05 \cdot 3,5 \cdot 0,12 \cdot \sin 28,4^\circ \\ &= 0,44\text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{h\text{ cu}} - 20\text{ }^\circ\text{C} &= (C_{F\text{ cu}} - 20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (C_{D\text{ cu}} - 20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (b_{c\text{ cu}} + 60\text{ }^\circ\text{C}) \cdot \sin \delta_{1\text{ cu}} \\ &= 1,05 \cdot 2,8 \cdot 0,14 \cdot \sin 24,2^\circ \\ &= 0,35\text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{h\text{ cu}} + 60\text{ }^\circ\text{C} &= (C_{F\text{ cu}} + 60\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (C_{D\text{ cu}} + 60\text{ }^\circ\text{C}) \cdot (b_{c\text{ cu}} + 60\text{ }^\circ\text{C}) \cdot \sin \delta_{1\text{ cu}} \\ &= 1,05 \cdot 2,7 \cdot 0,15 \cdot \sin 24,2^\circ \\ &= 0,36\text{ m} \end{aligned}$$

Nilai ayunan maksimum busbar di tengah rentang b_h saat hubung singkat pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem untuk masing-masing material aluminium dan tembaga terletak pada suhu operasional minimum $+60\text{ }^\circ\text{C}$ sebagai berikut.

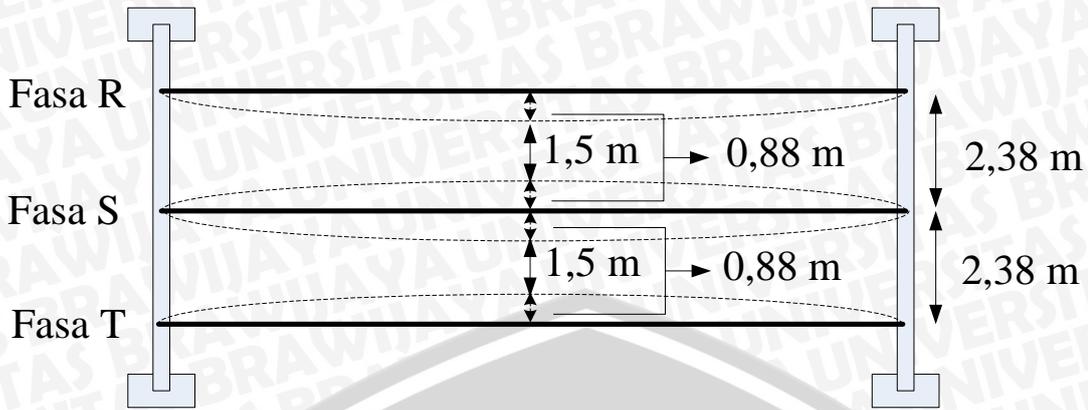
$$b_{h\text{ al}} = 0,44\text{ m}$$

$$b_{h\text{ cu}} = 0,36\text{ m}$$

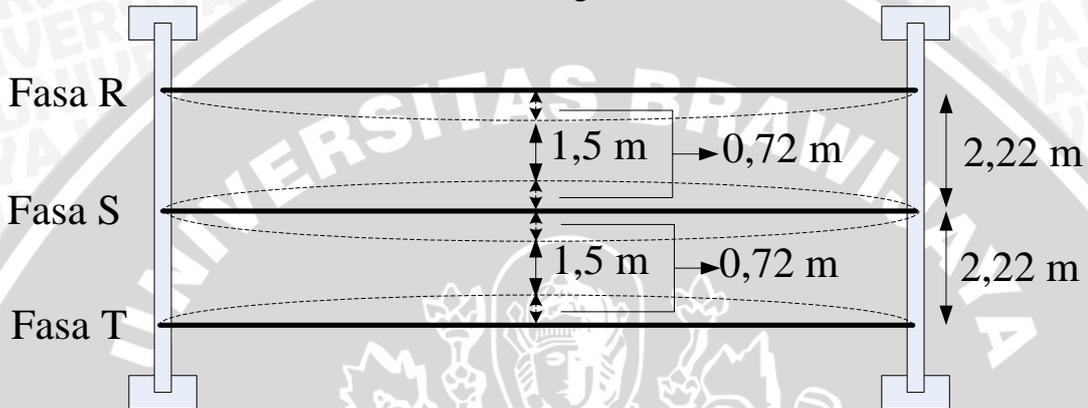
Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa busbar a_b untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dengan mempertimbangkan ayunan maksimum busbar di tengah rentang b_h saat hubung singkat seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.14 dan 4.15 yang dihitung dengan Persamaan 2-36 berikut.

$$a_{b\text{ al}} = a + (2 \cdot b_{h\text{ al}}) = 1,5 + (2 \cdot 0,44) = 1,5 + 0,88 = 2,38\text{ m}$$

$$a_{b\text{ cu}} = a + (2 \cdot b_{h\text{ cu}}) = 1,5 + (2 \cdot 0,36) = 1,5 + 0,72 = 2,22\text{ m}$$



Gambar 4.14 Jarak Aman Minimum Pemasangan Antar Fasa Busbar untuk Aluminium



Gambar 4.15 Jarak Aman Minimum Pemasangan Antar Fasa Busbar untuk Tembaga

Rekapitulasi penghitungan keseluruhan busbar pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem ditunjukkan dalam Lampiran 1.

4.7 Penggambaran Tata Letak Busbar pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

Gambar tata letak busbar pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem beserta jenis material busbar, bentuk penampang busbar, konfigurasi busbar, jarak aman minimum antar bagian aktif, jarak aman minimum antara bagian aktif fasa ke bumi, ketinggian minimum di dalam instalasi, ketinggian minimum di luar instalasi, jarak aman minimum antar peralatan di dalam instalasi, jarak aman minimum antar peralatan di luar instalasi, jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan untuk manusia, jarak aman minimum jalan masuk transportasi untuk kendaraan, jarak gawang, panjang isolator rantai, panjang busbar, andongan busbar, panjang uluran busbar, andongan maksimum busbar di tengah rentang saat hubung singkat, ketinggian minimum pemasangan busbar, ayunan maksimum busbar di tengah rentang saat hubung singkat, dan jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa busbar seperti ditunjukkan dalam Lampiran 2.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis pada perencanaan *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Perencanaan *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem sebagai berikut.
 - a. *Busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem ditentukan menggunakan jenis material aluminium atau tembaga dan bentuk penampang kawat pilin.
 - b. Dimensi *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem ditentukan 19 kawat pilin dengan masing-masing pilin berdiameter 2,5 mm untuk aluminium dan 2,1 mm untuk tembaga.
 - c. Jenis konfigurasi *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem ditentukan menggunakan dua bus-satu pemutus daya.
2. Tata letak *busbar* pada latar hubung 150 kV di PLTA Baliem sebagai berikut.
 - a. Ketinggian minimum di dalam instalasi 3,94 m dan di luar instalasi 6 m.
 - b. Jarak aman antar peralatan di dalam instalasi 1,8 m dengan memasang rantai/tali dan di luar instalasi 3 m dengan memasang kawat jaring.
 - c. Jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan untuk manusia 1,9 m dan transportasi untuk kendaraan 6,6 m.
 - d. Panjang *busbar* adalah 22,8 m.
 - e. Ketinggian minimum pemasangan *busbar* 4,32 m untuk aluminium dan 4,35 m untuk tembaga.
 - f. Gaya tarik *busbar* pada tiang ujung adalah 6459,35 N untuk aluminium dan 6500,1 N untuk tembaga.
 - g. Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa *busbar* 2,38 m untuk aluminium dan 2,22 m untuk tembaga.

5.2 Saran

Setelah pelaksanaan penelitian beberapa hal yang disarankan sebagai berikut.

1. Perencanaan *busbar* dilakukan dengan memperhitungkan faktor non teknis seperti biaya.
2. Perencanaan yang dilakukan tidak hanya sebatas perencanaan *busbar* saja, tapi dilakukan perencanaan gardu induk secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Asea Brown Boveri. 2001. *Swichgear Manual*. Berlin: Asea Brown Boveri.
- ASCE Subcommittee. 2008. *Substation Structure Design Guide*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Brand, K., Lohmann, V. & Wimmer, W. 2003. *Substation Automation Handbook*. Bremgarten: Utility Automation Consulting Lohmann.
- Gonen, Turan. 1986. *Electrical Power Distribution System Engineering*. New York: Mc.
- Hidayatulloh, R. 2012. *Analisa Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan SUTT 150 kV Jalur Kebasen-Balapulang-Bumiayu menggunakan Program ETAP*. Skripsi tidak dipublikasikan. Semarang: Universitas Diponegoro.
- IEC. 1976. *IEC 60076-5: Ability to withstand Short Circuit*. Switzerland: International Electrotechnical Comission.
- Machowski, J., Bialek, J. W. & Bumby, J. R. 2008. *Power System Dynamics Stability and Control*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- PT PLN. 2010. *Kriteria Disain Enjinereng Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta: PT PLN.
- PT PLN. 2014. *Rencana Analisis Masalah dan Dampak Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Air Baliem*. PT PLN.
- PT PLN. 2014. *Studi Kelayakan PLTA Baliem*. PT PLN.
- Sheldrake, A. L. 2003. *Handbook of Electrical Engineering for Practinioners in the Oil, gas and Petrochemical Industry*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Sofyan, B. T. 2011. *Pengantar Material Teknik*. Salemba Teknika: Jakarta
- Stevenson, W. D. 1996. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Suswanto, D. 2009. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Padang: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
- Taylor & Francis Group. 2007. *Electric Power Substations Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Transpower. 2009. *Clearances and Conductor Spacings*. New Zealand: Transpower.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Rekapitulasi Penghitungan Perencanaan Busbar pada Latar Hubung 150 kV di PLTA Baliem

	Satuan	Material	
		Aluminium	Tembaga
PG	MW	5	
$\cos \varphi$		0,8	
SG	MVA	6,25	
I_n 3 fasa	A	240,5	
KHA	A	300,8	
Jumlah pilin		19	19
Diameter pilin	mm	2,5	2, 1
Diameter total	mm	12,5	10,5
Luas Penampang	mm ²	93,27	65,81
Arus kontinu	A	340	310
kV _{dasar}	kV	11	
MVA _{dasar}	MVA	13	
Z_1G	pu	j0,4368	
Z_1T	pu	j0,1198	
Z_1	pu	j0,0676	
I_f 3 fasa	pu	- j14,782	
I_{dasar}	A	682,323	
I_f 3 fasa	A	10086∠-90,05°	
A	mm	1500	
N	mm	1500	
H	mm	3940	
H'	mm	6000	
O_2	mm	1800	
E	mm	3000	
M_a	mm	1900	
T	mm	1600	
a_{T-T}	m	6	
l_s	m	13	
L	m	26	
l_i	m	1,6	
l_c	m	22,8	
a_k	m	0,45	
l_u	m	26,02	

Lanjutan Lampiran 1

	Satuan	Material			
		Aluminium		Tembaga	
		-20 °C	+60 °C	-20 °C	+60 °C
m'	kg/m	1,687		2,027	
Tambahan beban	kg/m	1,431		1,431	
g_n	N/kg	9,80665			
F_{st}	N	12126,4	11370,4	12126,4	11370,4
b_c	m	0,11	0,12	0,14	0,15
H_b	m		3,87		3,9
I_{k2}^2	(kA) ²	76,3			
F'	N/m	8,92			
r		0,54		0,45	
δ_1	°	28,4		24,2	
T	s	0,61	0,63	0,67	0,69
T_{k11}	s	0,24	0,25	0,27	0,28
T_{res}	s	0,58	0,6	0,64	0,67
Φ		0,41		0,29	
E	kN/mm ²	57		105	
σ_{fin}	N/mm ²	50			
E_s	N/mm ²	57000		105000	
S	N/mm	500			
N	/N	$265 \cdot 10^{-9}$		$221,6 \cdot 10^{-9}$	
Z		0,02	0,02	0,03	0,04
Ψ		0,16	0,16	0,25	0,25
F_t	N	12918,7	12113,3	13000,2	12190
δ_m	°	68		60	
F_f	N	-	-	-	-
F_t tiang ujung	N	6459,35	-	6500,1	-
ε_{ela}		$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
ε_{th}	$\frac{m^4}{A^2 s}$	$4,6 \cdot 10^{-22}$	$4,7 \cdot 10^{-22}$	$3,3 \cdot 10^{-22}$	$3,4 \cdot 10^{-22}$
ε_{th}	$\frac{m^4}{A^2 s}$				
C_F		1,05			
C_D		3,7	3,5	2,8	2,7
b_h	m	0,43	0,44	0,35	0,36
a_h	m		3,87		3,9

