

**PERENCANAAN *DOUBLE BUSBAR* 70 kV PADA GARDU INDUK  
SENGKALING**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**RIFQI HASYEMI TAUFIQURRAHMMAN**  
**NIM. 125060300111078**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**MALANG**

**2016**

## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah Skripsi ini dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 27 Mei 2016

Mahasiswa

Rifqi Hasyemi Taufiqurrahman

NIM. 125060300111078



## RINGKASAN

**Rifqi Hasyemi Taufiqurrahman**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Mei 2016. **Perencanaan *Double Busbar* 70 kV pada Gardu Induk Sengkaling**. Dosen Pembimbing: Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.

Kebutuhan energi listrik di Malang Raya tiap tahun terus meningkat. Kota Malang yang terkenal sebagai Kota Pendidikan menuntut suplai energi yang besar dari operasional instansi pendidikan serta faktor pendukung lainnya. 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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling. Dalam merencanakan sebuah busbar perlu dilakukan kajian tentang kelistrikan, mekanikal, lingkungan, dan lokasinya. Kajian kelistrikan yang dibahas dalam penelitian ini menyangkut daya yang akan disalurkan, pemilihan tingkat tegangan, analisis hubung singkat, jarak aman, serta tata letak peralatan Gardu Induk.

*Double busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling ditentukan menggunakan aluminium atau tembaga berbentuk kawat pilin, berdimensi 61 pilin diameter 29,1 mm untuk aluminium dan 26 mm untuk tembaga, jenis konfigurasi dua bus-satu pemutus daya. Ketinggian minimum di dalam instalasi 3,19 m dan di luar instalasi 5,25 m. Jarak aman antar peralatan di dalam instalasi 1,05 m dengan memasang rantai/tali dan di luar instalasi 2,25 m dengan memasang kawat jaring. Jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan untuk manusia 1,9 m dan untuk transportasi 5,85 m. Panjang *busbar* adalah 36,248 m. Ketinggian minimum pemasangan *busbar* 4,23 m untuk aluminium dan 4,58 m untuk tembaga. Gaya tarik *busbar* pada tiang ujung adalah 6149,15 N untuk aluminium dan 6114,7 N untuk tembaga. Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa *busbar* 1,03 m untuk aluminium dan 0,93 m untuk tembaga.

**Kata kunci** – *double busbar*, latar hubung 70 kV, Gardu Induk Sengkaling

## SUMMARY

**Rifqi Hasyemi Taufiqurrahman**, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya. May 2016. 70 kV Double Busbar Planning in Sengkaling Substation. Academic Supervisor: Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. and Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.*

Electric energy needs in Malang Raya continues to increase every year. Malang is famous as Education City requires huge energy supply of operational educational establishments as well as other supporting factors. One of the essential components of the background circuit (substation) is a busbar which is a good conductor of electric current that can deliver electric current and voltage in large capacity. The purpose of this study is to get the planning and layout of the busbars on the background of circuit 70 kV substation in Sengkaling. In planning a busbar necessary to study about the electrical, mechanical, environmental, and location. Electrical studies involving supplied electrical power, the selection of voltage levels, short circuit analysis, safe distance, as well as the layout of substation equipment.

Double busbar on the 70 kV Substation in Sengkaling determined using aluminum or copper wires with twisted shape, the dimension is 61 gyre with a diameter 29,1 mm for aluminum and 26 mm for copper, using two bus-single power breaker type of busbar. The minimum height is 3,19 m in the installations and 5,25 m outside plant. A safe distance between equipment within installation is 1,05 m by installing chain / rope and 2,25 m beyond the installation by installing wire mesh. Minimum safe distance for human is 1,9 m and 5,85 m for transportation. Busbar length is 36,248 m. The minimum height is 4,23 m for the aluminium busbar mounting and 4,58 m for copper. Busbar tensile on the pole tip is 6149,15 N for aluminium and 6114,7 N for copper. Minimum safe distance in the phase to phase busbars is 1,03 m for aluminum and 0,93 m for copper.

**Keywords** – double busbar, switchyard 70 kV, Sengkaling substation

## PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Perencanaan Double Busbar 70 kV pada Gardu Induk Sengkaling” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada:

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. Mahfudz Shidiq, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
4. Keluarga tercinta Ayahanda Alm. Abdul Choliq yang terlebih dahulu dipanggil Allah SWT setahun yang lalu, Ibunda Eka Pertiwi yang selalu memberikan kasih sayang, motivasi dan do'anya yang tiada akhir, serta kedua adik tercinta Nailurriza Asma'urrahman dan Mursyidan Amrullah Intivada atas segala macam dukungan yang telah diberikan.
5. Seluruh teman-teman angkatan 2012 (Voltage), terutama teman-teman konsentrasi Teknik Energi Elektrik (Power 2012) yang telah berbagi suka dan duka dalam perkuliahan dan memberikan semangat dalam proses pengerjaan skripsi ini.
6. Seluruh teman-teman BK dan kos paus atas bantuan, motivasi, kerjasama, dan kebersamaan dalam proses pengerjaan skripsi.
7. Semua pihak yang telah membantu dan tidak bisa disebut satu persatu, terimakasih banyak atas semua bantuannya.

Disadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dan diharapkan agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta bagi masyarakat.

Malang, 27 Mei 2016

Penulis



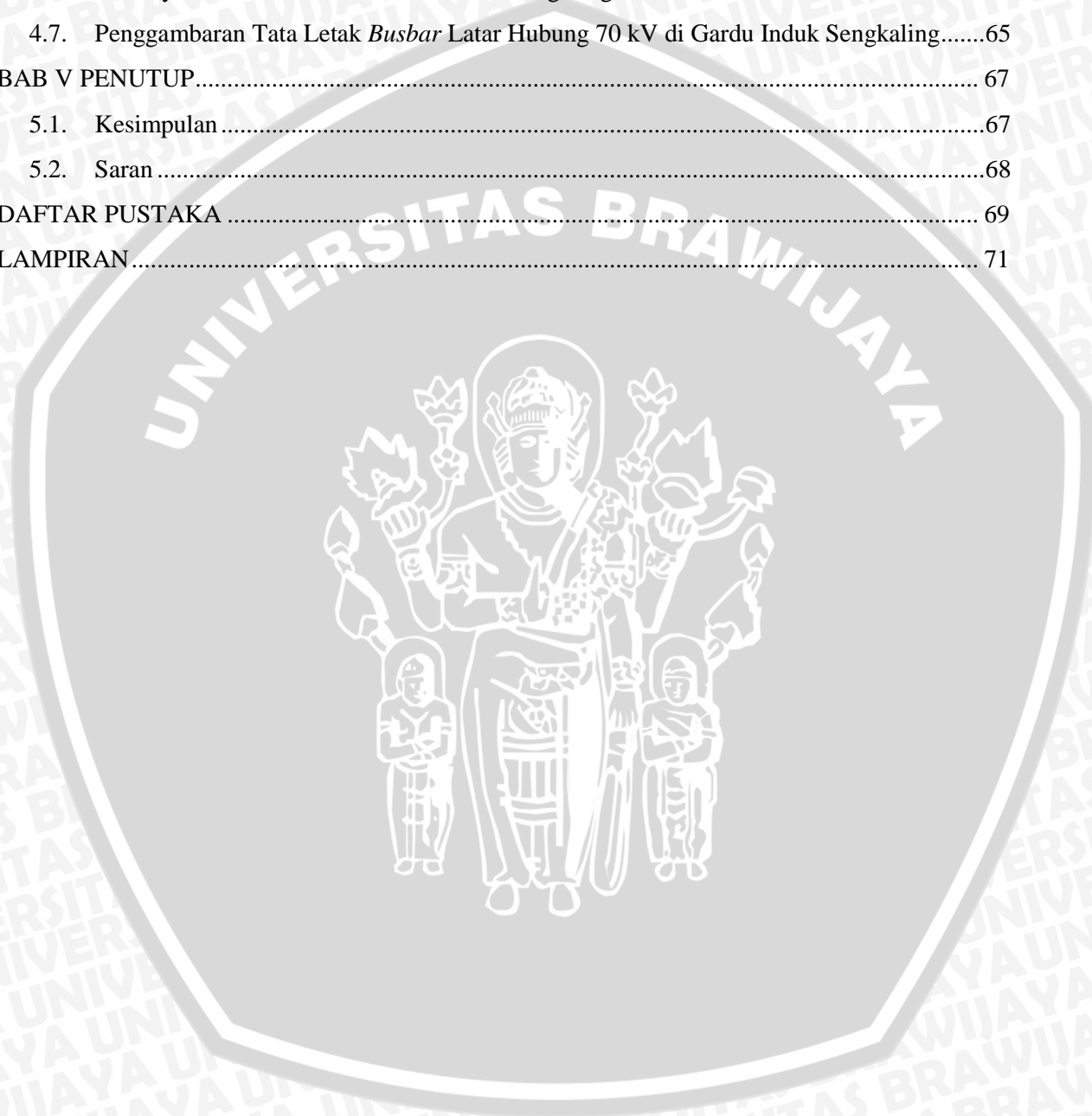
## DAFTAR ISI

PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR .....	v
DAFTAR TABEL.....	vi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah .....	2
1.4. Tujuan .....	3
1.5. Sistematika Penulisan .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. <i>Busbar</i> pada Gardu Induk .....	5
2.1.1 Jenis Material <i>Busbar</i> .....	6
2.1.2 Bentuk Penampang <i>Busbar</i> .....	8
2.1.3 Dimensi <i>Busbar</i> .....	10
2.2. Konfigurasi <i>Busbar</i> .....	12
2.2.1 Konfigurasi Bus Tunggal .....	12
2.2.2 Konfigurasi Satu Setengah Pemutus Daya.....	13
2.2.3 Konfigurasi Bus Utama dan Bus Transfer .....	14
2.2.4 Konfigurasi Bus Cincin.....	15
2.2.5 Konfigurasi Dua Bus-Satu Pemutus Daya .....	16
2.2.6 Konfigurasi Dua Bus-Dua Pemutus Daya.....	17
2.3. Parameter Tata Letak <i>Busbar</i> .....	19
2.3.1 Jarak Aman Minimum Bagian Aktif pada Latar Hubung .....	19
2.3.2 Panjang <i>Busbar</i> .....	21
2.3.3 Penggambaran Tata Letak <i>Busbar</i> .....	25
2.4. <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat.....	25
2.4.1 Gaya Tarik <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat.....	25
2.4.2 Gaya Jatuh <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat .....	28
2.4.3 Gaya pada Penyangga saat Hubung Singkat .....	29
2.4.4 Andongan Maksimum <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat .....	29
2.4.5 Ayunan Maksimum <i>Busbar</i> saat Hubung Singkat .....	30
2.5. Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa.....	31

2.5.1	Perhitungan Arus Hubung Singkat Tiga Fasa.....	32
2.5.2	Impedansi Urutan Positif Ekuivalen Jaringan.....	32
2.5.3	Impedansi Urutan Positif Transformator.....	33
2.5.4	Nilai Dasar .....	34
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>		<b>35</b>
3.1	Studi Literatur .....	36
3.2	Pengambilan Data.....	36
3.3	Perhitungan dan Analisis .....	37
3.3.1	Perhitungan Arus Hubung Singkat.....	37
3.3.2	Penentuan Konfigurasi <i>Busbar</i> .....	37
3.3.3	Penentuan Material <i>Busbar</i> .....	37
3.3.4	Perhitungan Dimensi <i>Busbar</i> .....	37
3.4	Kesimpulan dan Saran .....	37
<b>BAB IV PERENCANAAN <i>BUSBAR</i> PADA LATAR HUBUNG 70 kV DI GARDU INDUK SENGKALING .....</b>		<b>41</b>
4.1.	Gardu Induk Sengkaling .....	41
4.1.1	Sistem 70 kV Gardu Induk Sengkaling Sebelum Perencanaan Double Busbar.....	42
4.1.2	Sistem 70 kV Gardu Induk Sengkaling Setelah Perencanaan Double Busbar .....	42
4.2.	Penentuan Jenis Material, Bentuk Penampang, dan Dimensi <i>Busbar</i> pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.....	43
4.2.1	Penentuan Jenis Material Busbar pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.....	43
4.2.2	Penentuan Bentuk Penampang Busbar pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.....	43
4.2.3	Penentuan Dimensi Busbar Kawat Pilin pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.....	44
4.3.	Penentuan Konfigurasi <i>Busbar</i> pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling ..	45
4.4.	Penghitungan Parameter Tata Letak <i>Busbar</i> .....	47
4.4.1	Penghitungan Jarak Aman Minimum Bagian Aktif <i>Busbar</i> .....	47
4.4.2	Penghitungan Panjang <i>Busbar</i> .....	49
4.5.	Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa <i>Busbar</i> pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling .....	52
4.5.1	Penentuan Nilai Dasar.....	52
4.5.2	Impedansi Sumber.....	52
4.5.3	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.....	56
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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.....	65
BAB V PENUTUP.....		67
5.1.	Kesimpulan .....	67
5.2.	Saran .....	68
DAFTAR PUSTAKA .....		69
LAMPIRAN.....		71



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Tiga Komponen Utama dalam Penyaluran Tenaga Listrik .....	5
Gambar 2. 2 Beberapa Macam Bentuk Penampang Konduktor Padat.....	9
Gambar 2. 3 Penampang Konduktor Berbentuk Kawat Pilin Susunan 7 dan 19 Kawat.....	9
Gambar 2. 4 Konfigurasi Bus Tunggal .....	13
Gambar 2. 5 Konfigurasi Satu Setengah Pemutus Daya .....	13
Gambar 2. 6 Konfigurasi Bus Utama dan Transfer.....	14
Gambar 2. 7 Konfigurasi Bus Cincin .....	15
Gambar 2. 8 Konfigurasi Dua Bus-Satu Pemutus Daya.....	16
Gambar 2. 9 Konfigurasi Dua Bus-Dua Pemutus Daya .....	17
Gambar 2. 10 Ketinggian Pemasangan Peralatan-Peralatan pada Latar Hubung.....	20
Gambar 2. 11 Pembatas dan Ketinggian pada Instalasi.....	20
Gambar 2. 12 Jarak Aman Minimum Transportasi Latar Hubung Luar Ruangan .....	21
Gambar 2. 13 Panjang <i>Busbar</i> dengan Andongan.....	22
Gambar 2. 14 Andongan konduktor hingga 150 m pada suhu konduktor +80 °C .....	23
Gambar 2. 15 Tinggi Rantai Isolator <i>h</i> .....	23
Gambar 2. 16 Jarak Aman Dinding Perlindungan Kebakaran pada Transformator.....	24
Gambar 2. 17 Tata Letak <i>Busbar</i> pada Latar Hubung dengan Dua <i>Busbar</i> .....	25
Gambar 2. 18 Faktor Reaksi Rentang $\psi$ Terhasap Tekanan $\zeta$ dan Beban $\phi$ .....	27
Gambar 2. 19 Sudut Maksimum Ayunan $\delta_m$ sebagai Fungsi dari Durasi Hubung Singkat yang Relevan $T_{k11}$ berdasarkan Periode Osilasi Konduktor $T$ .....	29
Gambar 2. 20 Ketinggian Minimum Pemasangan <i>Busbar</i> .....	30
Gambar 2. 21 Jarak Aman Minimum Pemasangan Fasa ke Fasa <i>Busbar</i> .....	30
Gambar 2. 22 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa .....	32
Gambar 3. 1 Diagram Alir Metode Penelitian.....	35
Gambar 4. 1 Letak Gardu Induk Sengkaling.....	41
Gambar 4. 2 Single Line Diagram Gardu Induk Sengkaling dengan <i>Single Busbar</i> .....	42
Gambar 4. 3 Single Line Diagram Gardu Induk Sengkaling dengan <i>Double Busbar</i> .....	42
Gambar 4. 4 Dimensi <i>Busbar</i> Kawat Pilin: a) Aluminium b) Tembaga .....	45
Gambar 4. 5 Pembatas dan Ketinggian pada Instalasi .....	48
Gambar 4. 6 Ketinggian Peralatan-Peralatan Latar Hubung 70 kV Gardu Induk Sengkaling .....	49
Gambar 4. 7 Jarak Aman Minimum Transportasi Latar Hubung Luar Ruangan .....	49
Gambar 4. 8 Jarak Aman Fasa ke Fasa Latar Hubung 70 kV Gardu Induk Sengkaling .....	50
Gambar 4. 9 Jarak Aman Antar Transformator Latar Hubung 70 kV GI Sengkaling.....	50
Gambar 4. 10 Panjang <i>Busbar</i> dengan Andongan.....	51
Gambar 4.11 Single Line Diagram 70 kV Gardu Induk Sengkaling.....	54
Gambar 4.12 Rangkaian Impedansi Urutan Positif.....	54
Gambar 4. 13 Ketinggian Minimum Pemasangan <i>Busbar</i> untuk Material Aluminium .....	56
Gambar 4. 14 Ketinggian Minimum Pemasangan <i>Busbar</i> untuk Material Tembaga.....	56
Gambar 4. 15 Jarak Aman Minimum Pemasangan Antar Fasa <i>Busbar</i> untuk Aluminium.....	65
Gambar 4. 16 Jarak Aman Minimum Pemasangan Antar Fasa <i>Busbar</i> untuk Tembaga .....	65

**DAFTAR TABEL**

Tabel 2. 1 Nilai-Nilai Khas untuk Sifat Fisik Material Konduktor ..... 7

Tabel 2.2 Perbandingan Sifat Paling Penting dari Bahan Konduktor yang Umum ..... 8

Tabel 2. 3 Dimensi *Busbar* Kawat Pilin Aluminium dan Tembaga ..... 11

Tabel 2. 4 Keuntungan dan Kerugian Jenis Konfigurasi *Busbar* ..... 18

Tabel 2. 5 Jarak Aman pada *Busbar* untuk Instalasi Latar Hubung Luar Ruangan ..... 19

Tabel 2. 6 Jumlah Isolator Rantai untuk Instalasi Latar Hubung Luar Ruangan ..... 24

Tabel 2. 7 Jarak Aman Dinding Perlindungan Kebakaran ..... 24

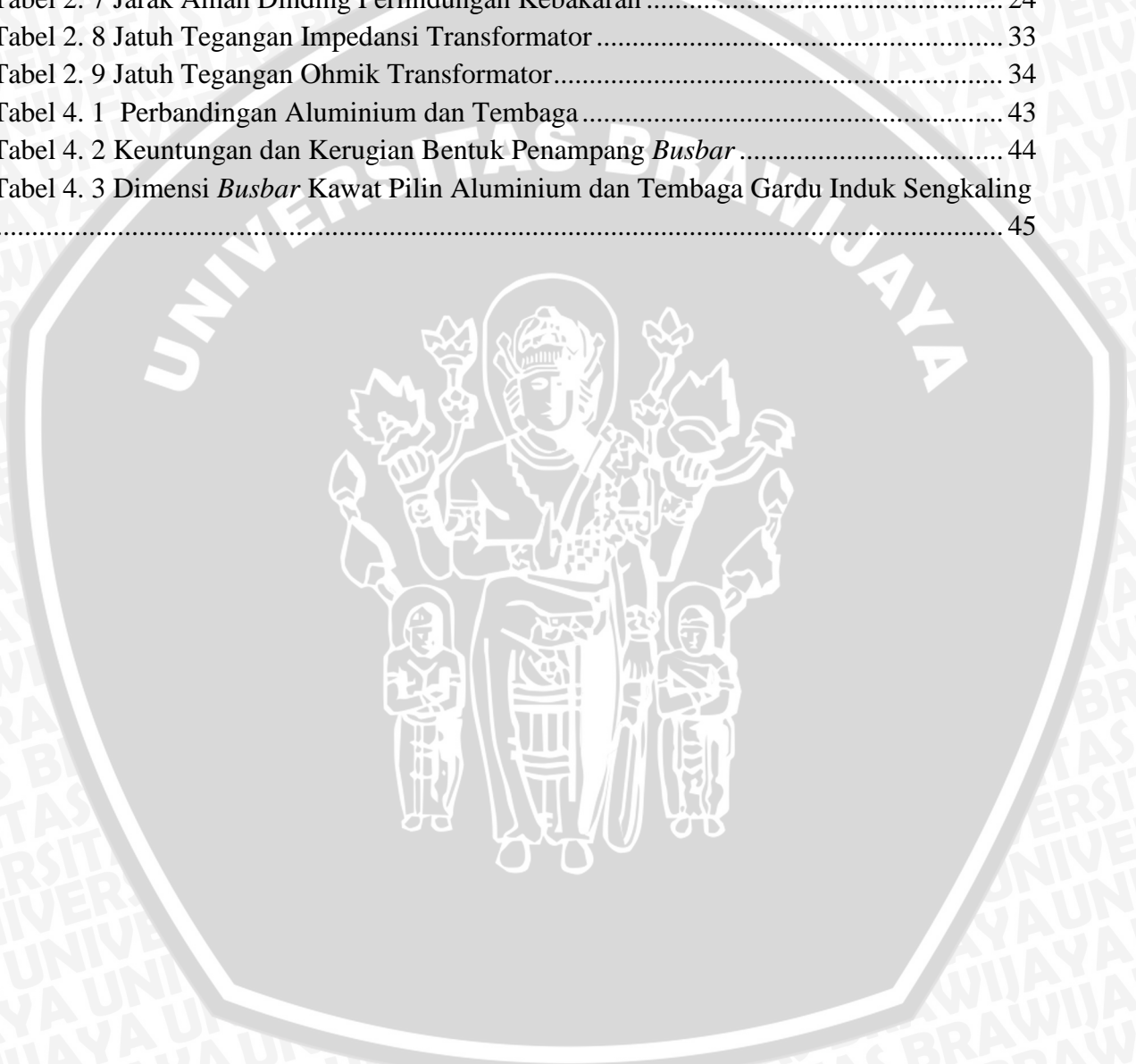
Tabel 2. 8 Jatuh Tegangan Impedansi Transformator ..... 33

Tabel 2. 9 Jatuh Tegangan Ohmik Transformator ..... 34

Tabel 4. 1 Perbandingan Aluminium dan Tembaga ..... 43

Tabel 4. 2 Keuntungan dan Kerugian Bentuk Penampang *Busbar* ..... 44

Tabel 4. 3 Dimensi *Busbar* Kawat Pilin Aluminium dan Tembaga Gardu Induk Sengkaling  
..... 45





## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di Malang Raya tiap tahun terus meningkat. Kota Malang yang terkenal sebagai Kota Pendidikan menuntut suplai energi yang besar dari operasional instansi pendidikan serta faktor pendukung lainnya. Kota Batu dan Kabupaten Malang merupakan wilayah yang memiliki objek wisata, pertanian, serta industri yang sangat banyak sehingga dibutuhkan energi listrik bagi hotel serta taman bermain yang semakin menjamur.

Gardu Induk (GI) sebagai komponen sistem tenaga listrik memegang peranan penting pada kontinuitas suplai tenaga listrik kepada konsumen. Dengan semakin bertambahnya permintaan konsumen listrik maka semakin besar pula beban listrik yang ditanggung oleh Gardu Induk. Apabila beban listrik yang ditanggung oleh GI lebih besar dari kapasitasnya maka GI akan mengalami *overload* yang mengakibatkan suplai listrik ke konsumen terhenti.

*Switchyard* merupakan bagian Gardu Induk yang dijadikan sebagai tempat peletakan komponen utama, yang terdiri dari kumpulan sakelar, pemutus daya, bus, dan peralatan bantu yang digunakan untuk mengumpulkan listrik dari generator pembangkit listrik dan mendistribusikannya ke saluran transmisi. Bagian-bagiannya adalah LA (*lightning arrester*), PT (*potential transformer*), CT (*current transformer*), DS (*disconnecting switch*), CB (*circuit breaker*), rel (*busbar*), ES (*earthing switch*), dan *local control panel*. *Switchyard* dapat mencakup transformator daya penaik atau penurunan tegangan. Sejauh struktur yang bersangkutan, istilah gardu induk dan *switchyard* dapat digunakan secara bergantian (ASCE Subcommittee, 2008).

Gardu Induk Sengkaling memiliki empat buah transformator, dua buah transformator berkapasitas 30 MVA dan dua buah transformator 60 MVA. Masing-masing transformator memiliki pertumbuhan beban berbeda. Berdasarkan data pembebanan, transformator I dan II menyuplai GI Blimbing dan Mendalan, sedangkan transformator III dan IV menyuplai penyulang. Transformator III menyuplai beban yang lebih sedikit daripada trafo IV. Berdasarkan perhitungan dan analisis pertumbuhan konsumsi energi akan meningkat pesat terutama pada sektor bisnis dan rumah tangga. Jumlah konsumsi energi sektor rumah tangga yaitu 928 GWh pada 2012 akan tumbuh menjadi 1.931 GWh

pada 2022. Seiring dengan perkembangan tersebut, tentu diikuti dengan kebutuhan energi listrik yang meningkat.

Salah satu komponen penting pada Gardu Induk selain transformator adalah *busbar* yang merupakan konduktor penghantar arus listrik yang dapat menyalurkan arus dan tegangan listrik kapasitas besar. Pada Gardu Induk Sengkaling sistem 70 kV hanya digunakan *single busbar*, sehingga keandalannya kurang. Apabila busbar dalam keadaan *maintenance* maka transformator I dan II harus padam. Hal ini akan merugikan PLN karena tidak bisa menyalurkan energi. Oleh sebab itu diperlukan pembaharuan sistem dengan menggunakan *double busbar* agar dapat dilakukan manuver beban apabila pada salah satu *bus* mengalami *trouble* atau dalam keadaan *maintenance*. Apabila keandalan sistem baik maka akan mengurangi terjadinya pemadaman, sehingga penyaluran energi oleh PLN dapat berjalan maksimal dan kerugian finansial dapat dikurangi.

Dalam merencanakan sebuah *busbar* perlu dilakukan kajian tentang kelistrikan, mekanikal, lingkungan, dan lokasinya. Kajian kelistrikan menyangkut daya yang akan disalurkan, pemilihan tingkat tegangan, analisis hubung singkat, jarak aman, serta tata letak peralatan Gardu Induk.

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dalam skripsi ini akan dibahas mengenai perencanaan *double busbar* pada *switchyard* 70 kV Gardu Induk Sengkaling guna memenuhi permintaan energi listrik di Malang Raya di masa yang akan datang dengan keandalan yang tinggi.

## 1.2. Rumusan Masalah

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

1. Berapa arus hubung singkat *busbar* pada *switchyard* 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.
2. Bagaimana perencanaan *double busbar* pada *switchyard* 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.

## 1.3. Batasan Masalah

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

1. Perencanaan *busbar* dilakukan di Gardu Induk Sengkaling.

2. Perencanaan *busbar* pada *switchyard* 70 kV disesuaikan dengan keadaan Gardu Induk Sengkaling.
3. Hanya membahas lingkup *busbar* saja tanpa membahas gardu induk secara menyeluruh.
4. Hanya membahas faktor teknis dan mekanis tanpa membahas faktor non-teknis dari perencanaan *double busbar*.
5. Tidak membahas sistem proteksi *busbar*.

#### 1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan konfigurasi, dimensi, dan material *double busbar* pada *switchyard* 70 kV Gardu Induk Sengkaling.

#### 1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### **BAB I PENDAHULUAN**

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

##### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi dasar teori yang berkaitan dengan perencanaan *busbar* yang meliputi teori tentang sistem tenaga listrik, gardu induk, *busbar*, konfigurasi *busbar*, material *busbar*, dimensi *busbar*, dan analisis hubung singkat.

##### **BAB III METODE PENELITIAN**

Menjelaskan tentang tahapan penelitian dalam perencanaan *busbar* yang meliputi studi literatur, pengambilan data, perhitungan data, analisis hasil perhitungan, serta pengambilan kesimpulan.

##### **BAB IV PEMBAHASAN**

Berisi tentang analisis hubung singkat pada perencanaan *busbar*, penentuan konfigurasi, dan material *busbar*, serta perhitungan dimensi *busbar* pada *switchyard* 70 kV Gardu Induk Sengkaling.

##### **BAB V PENUTUP**

Berisi kesimpulan hasil penelitian dan saran untuk perkembangan penelitian selanjutnya.

**DAFTAR PUSTAKA**

Memaparkan tentang sumber-sumber literatur yang digunakan dalam penelitian.



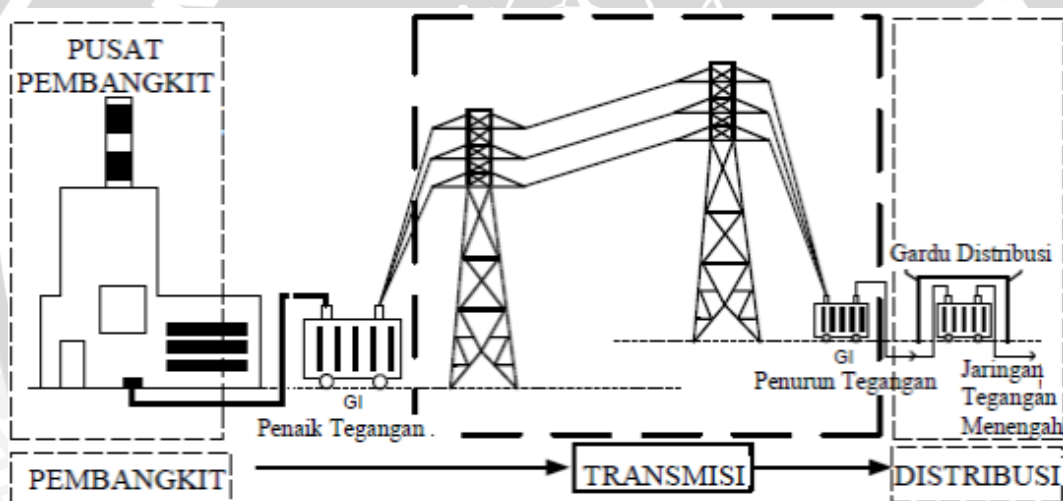


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 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, 2012:2).

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, 2011:261).

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, 2011:262).

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 $F_m$ minimum (N/mm <sup>2</sup> )	Modulus Young (N/mm <sup>2</sup> )	Gaya yang dihasilkan		Kekerasan Brinell HB 10 (N/mm <sup>2</sup> )	Konduktivitas $K$ pada 20 °C minimal (m/Ωmm <sup>2</sup> )
				$F_{p02}$ minimum (N/mm <sup>2</sup> )	$F'_{p02}$ maksimum (N/mm <sup>2</sup> )		
Tembaga	E-Cu F 20	200	11x10 <sup>4</sup>	-	120	450- 700	57,0
	E-Cu F 25	250	11x10 <sup>4</sup>	200	290	700- 950	56,0
	E-Cu F 30	300	11x10 <sup>4</sup>	250	360	800-1050	56,0
	E-Cu F 37	370	11x10 <sup>4</sup>	330	400	950-1150	55,0
Aluminium	E-Al F 6.5/7	65/70	6,5x10 <sup>4</sup>	25	80	200- 300	35,4
	E-Al F 8	80	6,5x10 <sup>4</sup>	50	100	220- 320	35,2
	E-Al F 10	100	6,5x10 <sup>4</sup>	70	120	280- 380	34,8
	E-Al F 13	130	6,5x10 <sup>4</sup>	90	160	320- 420	34,5
	Al F 10	100	≈6,5x10 <sup>4</sup>	70		280- 300	34,0
Logam campuran aluminium lentur	E-Al Mg SI 0.5 F 17	170	7x10 <sup>4</sup>	120	180	450- 650	32,0
	E-Al Mg SI 0.5 F 22	220	7x10 <sup>4</sup>	160	240	650- 900	30,0
Aluminium berhias tembaga	Cu comprises 15%	130	8x10 <sup>4</sup>	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 (terlapisi seng)
Kerapatan	kg/dm <sup>3</sup>	8,9	2,7	2,7	8,5	7,85
Konduktivitas elektrik pada 20 °C	m/Ωmm <sup>2</sup>	56	35	30	≈18	≈7
Konduktivitas elektrik pada 60 °C	m/Ωmm <sup>2</sup>	48	30	26	≈16	≈6
Konduktivitas/kerapatan	Ω <sup>-1</sup>	6,3	13	11	≈2	≈1
Resistansi spesifik pada 20 °C	Ωmm <sup>2</sup> /m	0,0178	0,0286	0,0333	≈0,0555	≈0,143
Koefisien suhu resistansi elektrik antara 1-100 °C	K <sup>-1</sup>	0,0038	0,004	0,0036	0,0024	0,005
Titik lebur	°C	1083	658	630	≈912	1400
Panas lebur	Ws/g	181,28	386,86	376,81	167,47	293,07
	Ws/cm <sup>3</sup>	1612	1047	1017	1444	2302
Panas spesifik antara 1-100 °C	Ws/g·K	0,393	0,92	0,92	0,397	0,485
	Ws/cm <sup>3</sup> ·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 <sup>2</sup> /m·K	0,017	0,024	0,023	0,018	0,012
Modulus Young	N/mm <sup>3</sup>	110000	65000	70000	≈90000	210000
Kerapatan batas arus termal	A/mm <sup>3</sup>	154	102	89	91	-
Kerapatan arus pelelehan	A/mm <sup>3</sup>	3060	1910	1690	1900	-

Sumber: ABB (2001:59)

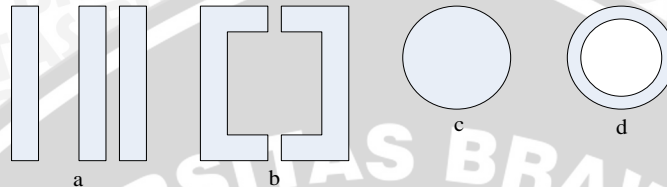
Kerapatan arus batas termal adalah kerapatan arus saat suhu konduktor naik dari 35°C sampai 200°C ketika dibebani selama 1s. Pembuangan panas konduktif diabaikan. Kerapatan arus pelelehan adalah kerapatan arus di mana suhu konduktor naik ke suhu leleh saat dibebani selama 0,01s. Nilai menurut Müller-Hillebrand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

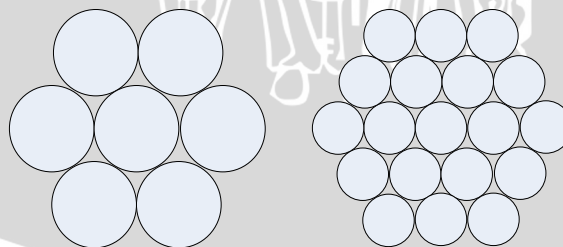
Konduktor padat merupakan konduktor tunggal yang hanya terdiri dari satu untai logam. Konduktor padat tangguh secara mekanis dan biaya produksinya lebih murah

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.

$$KHA = 1,25 \cdot I_n \quad (2-1)$$

dengan:

KHA : Kemampuan Hantar Arus (A)

$I_n$  : Arus nominal (A)

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

$$I_n = \frac{S_3 \text{ fasa}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL}} \quad (2-2)$$

dengan:

$I_n$  : Arus nominal (A)

$S_3 \text{ fasa}$  : Daya semu 3 fasa (VA)

$V_{LL}$  : Tegangan *line to line* (V)

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

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

dengan:

$S$  : Daya semu (VA)

$P$  : Daya aktif (watt)

$\cos \varphi$  : Faktor daya

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 <sup>2</sup> )	$N$	$d$ (mm)	$d_{total}$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$I$ (A)		$m'$ (kg/m)		$E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	
					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:

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

Nilai-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, 2007:3-1).

### 2.2.1 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.

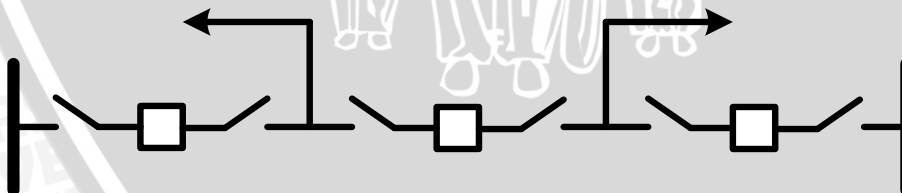


Gambar 2. 4 Konfigurasi Bus Tunggal  
Sumber: Taylor (2007:3-2)

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, 2007:3-1).

### 2.2.2 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.



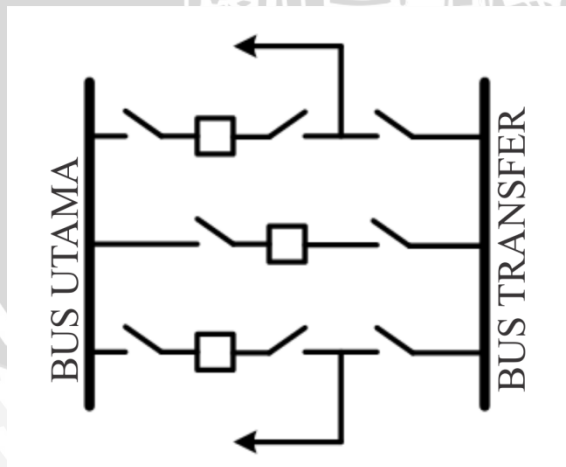
Gambar 2. 5 Konfigurasi Satu Setengah Pemutus Daya  
Sumber: Taylor (2007:3-5)

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, 2007:3-5).

### 2.2.3 Konfigurasi Bus Utama dan Bus 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.



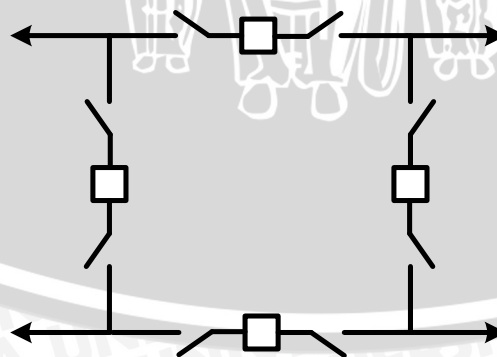
Gambar 2. 6 Konfigurasi Bus Utama dan Transfer  
Sumber: Taylor (2007:3-3)

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, 2007:3-3).

#### 2.2.4 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.



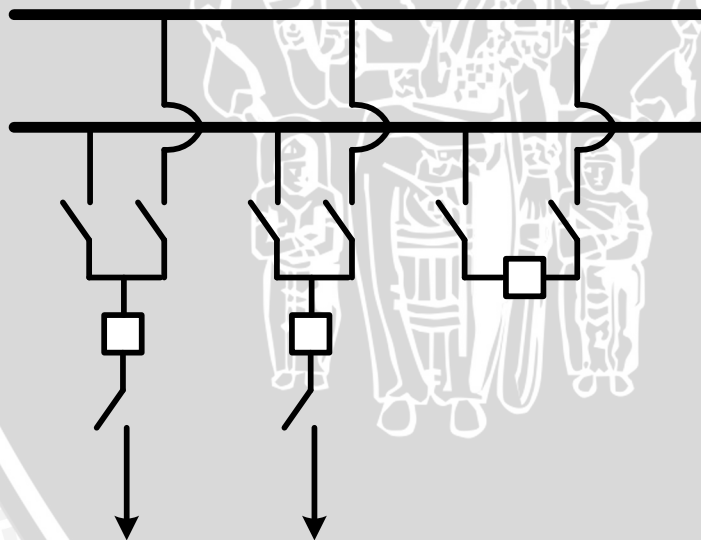
Gambar 2. 7 Konfigurasi Bus Cincin  
Sumber: Taylor (2007:3-5)

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, 2007:3-4).

### 2.2.5 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 dua 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.

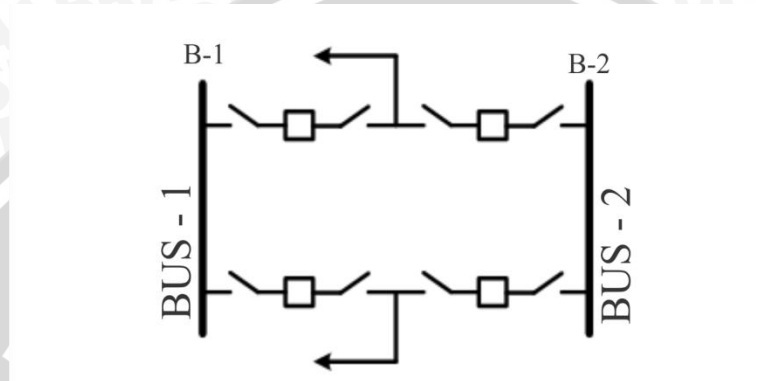


Gambar 2. 8 Konfigurasi Dua Bus-Satu Pemutus Daya  
Sumber: Taylor (2007:3-4)

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, 2007:3-4).

### 2.2.6 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, (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, 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 <i>busbar</i>	Keuntungan	Kerugian
Satu setengah pemutus daya	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biayanya sedang sesuai dengan keandalan dan fleksibilitas operasi yang tinggi</li> <li>- Keandalan tinggi</li> <li>- Fleksibilitas operasi dan pemeliharaan yang paling bagus</li> <li>- Kesalahan pemutus daya pada sisi <i>busbar</i> memisahkan hanya satu cabang</li> <li>- Setiap bus bisa diisolasi kapan saja</li> <li>- Semua operasi pensakelaran dieksekusi dengan pemutus daya</li> <li>- Pergantian pensakelaran mudah, tanpa menggunakan isolator</li> <li>- Kesalahan <i>busbar</i> tidak menyebabkan pemisahan cabang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perlu area yang lebih luas karena komponen tambahan dan kebutuhan area meningkat secara signifikan sesuai level tegangan yang lebih tinggi</li> <li>- Dibutuhkan tiga pemutus daya untuk dua cabang</li> <li>- Biaya yang lebih besar untuk proteksi dan auto-reclosure, seperti pemutus daya tengah harus menanggapi secara mandiri dalam arah kedua sumber</li> </ul>
Bus tunggal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biayanya yang paling rendah karena komponen yang dibutuhkan sedikit</li> <li>- Area yang dibutuhkan paling sempit karena komponen yang dibutuhkan sedikit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keandalan paling rendah</li> <li>- Bila <i>busbar</i> mengalami gangguan menyebabkan gangguan seluruh GI</li> <li>- Pemeliharannya sulit</li> <li>- Fleksibilitas operasi terbatas</li> <li>- Jika ingin memperluas gardu induk harus memutuskan instalasi</li> <li>- Pemeliharannya hanya bila beban dapat diputus atau dipasok dari tempat lain</li> </ul>
Bus utama dan transfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biayanya murah</li> <li>- Fleksibilitas operasi dan pemeliharaan lebih baik dari <i>single bus</i> karena ada bus transfer</li> <li>- Setiap pemutus daya dapat diakses untuk pemeliharaan tanpa memutus instalasi</li> <li>- Area yang dibutuhkan sempit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keandalan rendah</li> <li>- Dibutuhkan peralatan dan material lebih banyak daripada <i>single bus</i></li> <li>- pemutus daya tambahan untuk menghubungkan melalui <i>bypass</i></li> <li>- Bila <i>busbar</i> atau pemutus daya yang mana saja mengalami gangguan menyebabkan gangguan seluruh GI</li> </ul>
Dua bus-satu pemutus daya	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fleksibilitas pergantian yang tinggi</li> <li>- Masing-masing <i>busbar</i> dapat diisolasi untuk pemeliharaan</li> <li>- Masing-masing cabang dapat dihubungkan ke setiap bus dengan mengikat pemutus daya dan isolator <i>busbar</i> tanpa pemadaman</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biaya mahal karena peralatan ganda dan material tambahan</li> <li>- Keandalan sedang</li> <li>- Perlu area yang lebih luas karena peralatan ganda dan material tambahan</li> <li>- pemutus daya ekstra untuk penghubung</li> <li>- Proteksi <i>busbar</i> memisahkan cabang yang tersambung dengan bus yang rusak</li> <li>- Gangguan di cabang pemutus daya memisahkan semua cabang pada <i>busbar</i> yang terkena</li> <li>- Gangguan pada pemutus daya menyebabkan gangguan seluruh GI</li> </ul>
Dua bus-dua pemutus daya	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keandalan tinggi karena peralatan ganda</li> <li>- Setiap cabang memiliki dua pemutus daya</li> <li>- Memungkinkan hubungan untuk <i>busbar</i> yang mana saja</li> <li>- Masing-masing pemutus daya dapat dilayani tanpa memisahkan cabang</li> <li>- Ketersediaan tinggi</li> <li>- Kesalahan rangkaian tunggal atau bus hanya memisahkan komponen tersebut</li> <li>- Fleksibilitas operasi dan pemeliharaan tinggi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metode yang paling mahal karena peralatan ganda dan material tambahan</li> <li>- Perlu area yang lebih luas karena peralatan ganda dan material tambahan</li> <li>- Kerusakan pemutus daya menyebabkan setengah cabang putus jika tidak terhubung dengan kedua <i>busbar</i></li> <li>- Sirkuit cabang dipertimbangkan dalam sistem proteksi; berlaku juga untuk konsep pemutus daya ganda lainnya</li> </ul>

Konfigurasi busbar	Keuntungan	Kerugian
Bus cincin	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biayanya sedang karena perlu peralatan dan material tambahan</li> <li>- Perlu area sedang tergantung luasnya perkembangan gardu induk</li> <li>- Keandalan tinggi</li> <li>- Setiap pemutus daya dapat dipelihara tanpa memisahkan beban</li> <li>- Hanya dibutuhkan satu pemutus daya setiap cabang</li> <li>- Tidak dibutuhkan busbar utama</li> <li>- Setiap cabang terhubung ke jaringan oleh dua pemutus daya</li> <li>- Semua pergantian pensakelaran selesai dengan pemutus daya</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pemeliharaan pemutus daya dan gangguan apapun akan memutuskan ring</li> <li>- Dibutuhkan gambaran potensial dalam semua cabang</li> <li>- Sempit untuk pergantian pensakelaran</li> </ul>

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 $U_n$ (kV)	Tegangan maksimum peralatan $U_m$ (kV)	Jarak aman minimum fasa ke fasa $a$ dan fasa ke bumi $N$ (mm)
3	3,6	120
6	7,2	120
10	12,0	150
20	24,0	220
30	36,0	320
45	52,0	480
60	72,5	630
70	82,5	750
110	123,0	1100
150	170,0	1500
220	245,0	2100

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).

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

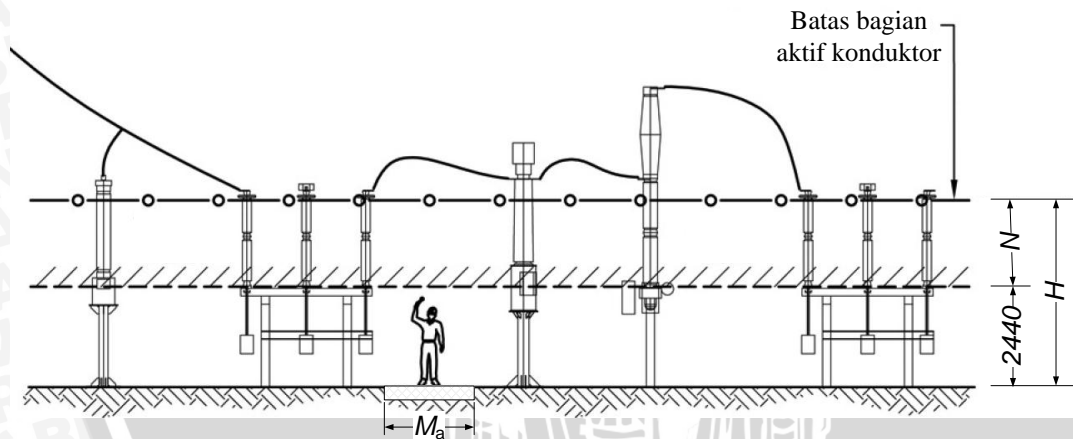
$$H' = N + 4500 \text{ mm (dengan nilai minimum 6000 mm)} \quad (2-5)$$

dengan:

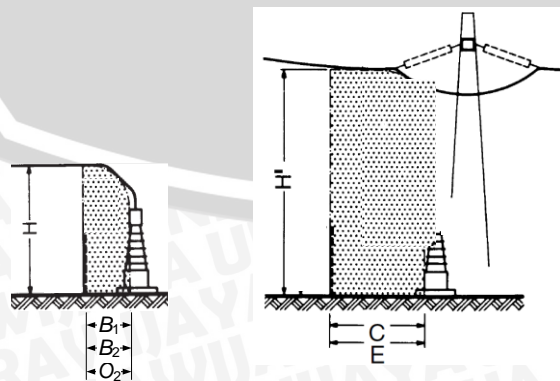
H : Ketinggian di dalam instalasi (mm)

H' : Ketinggian di luar instalasi (mm)

N : Jarak aman minimum bagian aktif (mm)



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).

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

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

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

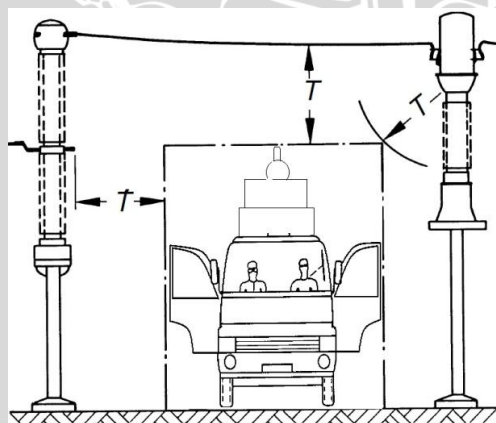
$$C = N + 1000 \text{ mm (untuk dinding panel pejal)} \quad (2-9)$$

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

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).

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

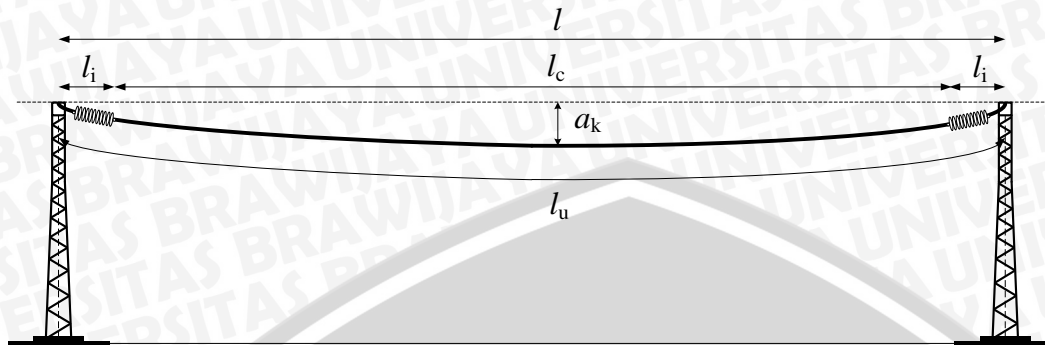


Gambar 2. 12 Jarak Aman Minimum Transportasi Latar Hubung Luar Ruangan  
Sumber: ABB (2001:179)

### 2.3.2 Panjang Busbar

Busbar pada umumnya 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

Sumber: ABB (2001:133)

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

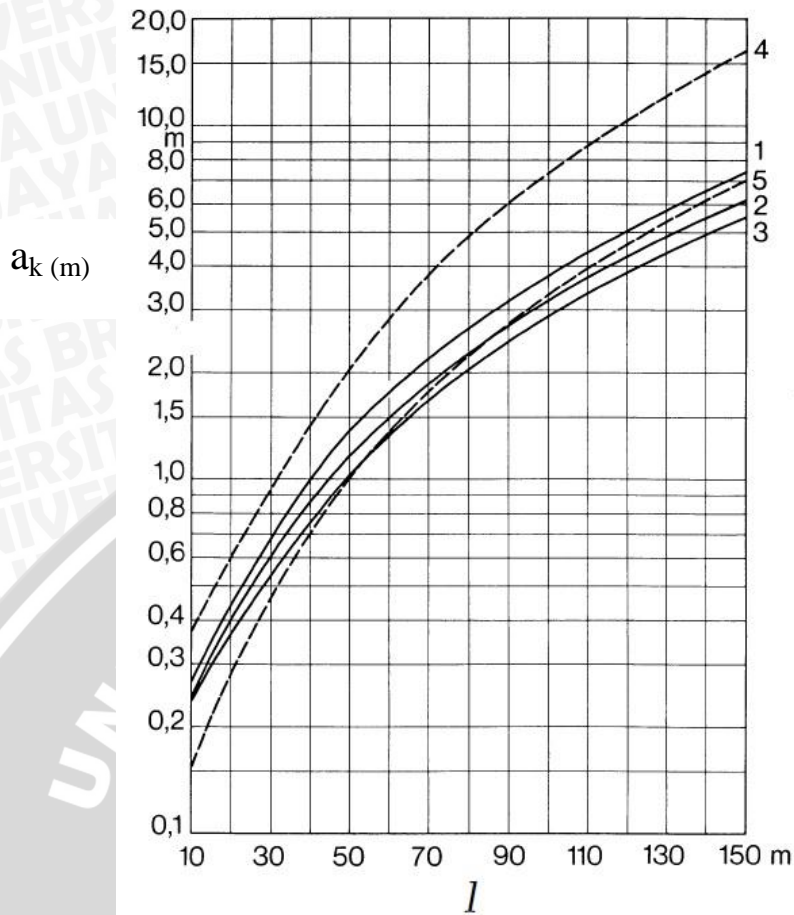
Hubungan  $l$ ,  $l_i$ ,  $l_c$ ,  $l_u$ ,  $a_k$ , dan  $b_c$  sesuai dengan Persamaan 2-12 dan 2-13 berikut.

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

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

#### 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  $+80^\circ\text{C}$ . Andongan konduktor  $a_k$  ditentukan berdasarkan nilai tegangan, panjang konduktor, dan luas penampang konduktor dengan Gambar 2.14.

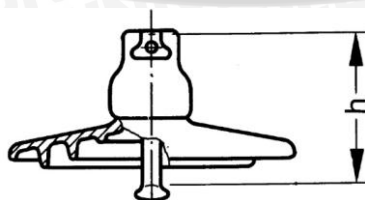


Gambar 2. 14 Andongan konduktor hingga 150 m pada suhu konduktor +80 °C  
 Sumber: ABB (2001:153)

- 1: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 400 mm<sup>2</sup>
- 2: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 300 mm<sup>2</sup>
- 3: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 200 mm<sup>2</sup>
- 4: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 200 mm<sup>2</sup>
- 5: luas penampang nominal Al atau Cu sampai dengan 500 mm<sup>2</sup>

## 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	36,0	3
45	52,0	4
60	72,5	5
110	123,0	8
150	170,0	9
220	245,0	11
380	420,0	15
480	525,0	20

Sumber: ABB (2001:642)

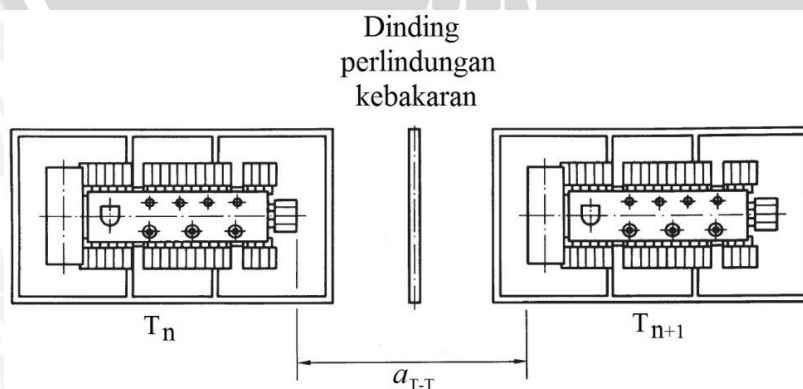
### 3. Jarak Aman Antar Transformator

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 (MVA)	Jarak aman $N_{T-T}$ (m)
1	3
10	5
40	10
200	15

Sumber: ABB (2001:194)



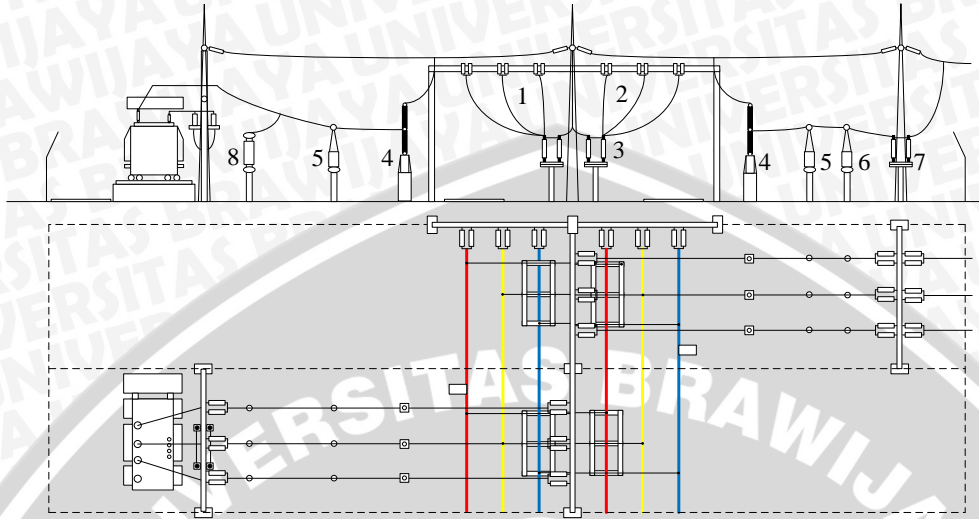
Gambar 2. 16 Jarak Aman Dinding Perlindungan Kebakaran pada Transformator  
Sumber: ABB, 2001:194

$T_n, T_{n+1}$ : Transformator bersebelahan

$a_{T-T}$  : Jarak aman transformator

### 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  
Sumber: ABB (2001:519)

- |                   |                           |
|-------------------|---------------------------|
| 1: Busbar I       | 5: Transformator arus     |
| 2: Busbar II      | 6: Transformator tegangan |
| 3: Pemisah busbar | 7: Pemisah feeder         |
| 4: Pemutus daya   | 8: Penangkap surja        |

### 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).

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

- $F$  : Gaya Tarik hubung singkat (N)  
 $F_{st}$  : Gaya Tarik Statis (N)

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

Parameter beban  $\varphi$  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.

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

$T_{k11}$  : Durasi hubung singkat (s)  
 $T$  : Periode osilasi konduktor (s)

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

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

$b_c$  : Andongan maksimum busbar (m)  
 $g_n$  : Konstanta gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

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

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

$T_{res}$  : Periode resultan osilasi konduktor (s)  
 $r$  : Konstanta gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

Rasio gaya  $r$  dihitung dengan Persamaan 2-19 berikut.

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

$F'$  : Kerapatan gaya elektrodinamik per satuan panjang ( $\text{N}/\text{kA}^2$ )  
 $m'$  : Berat busbar per satuan panjang ( $\text{kg/m}$ )

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

$$F' = k \cdot \frac{I_{k2}^2}{a} \cdot \frac{l_c}{l} \text{ dengan } k = 5,055 \text{ N}/\text{kA}^2 \quad (2-20)$$

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

$$I_{k2}^2 = 0,75 \cdot I_{k3}^2 \quad (2-21)$$

$I_{k2}''^2$  : nilai rms arus hubung singkat dua fasa (A)  
 $I_{k3}''^2$  : nilai rms arus hubung singkat tiga fasa (A)

$a$  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/s<sup>2</sup> atau 9,80665 N/kg.

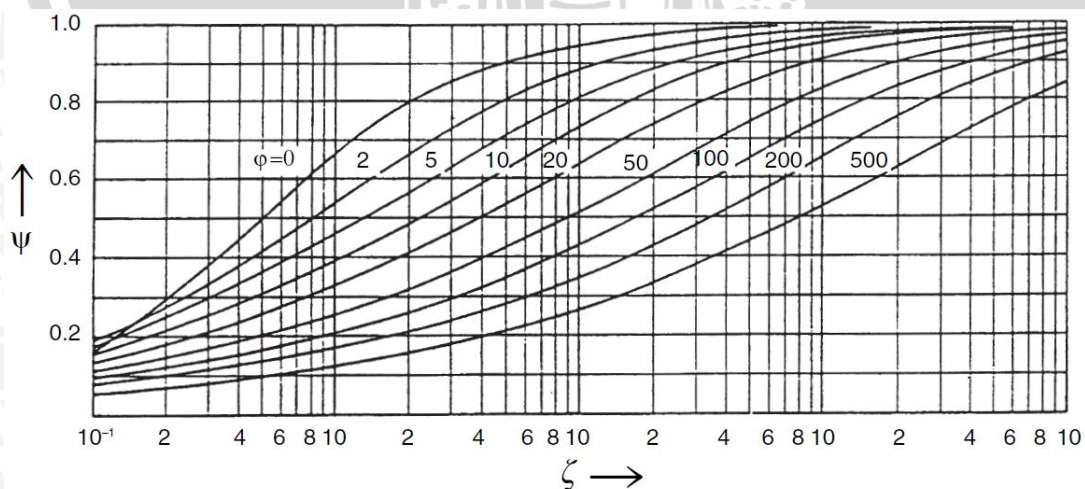
Sudut ayunan di akhir aliran arus hubung singkat  $\delta_k$  dihitung dengan Persamaan 2-22 berikut.

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

$\delta_1$  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  $\psi$  adalah fungsi dari faktor tekanan konduktor utama  $\zeta$  dan parameter beban  $\phi$ , seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.18 berikut.



Gambar 2. 18 Faktor Reaksi Rentang  $\psi$  Terhadap Tekanan  $\zeta$  dan Beban  $\phi$   
 Sumber: ABB (2001:136)

Faktor tekanan konduktor utama  $\zeta$  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.

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

$S$  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.

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

$E_s$  : Modulus elatisitas efektif ( $N/mm^2$ )

$E$  : Modulus Young ( $N/mm^2$ )

$\sigma_{fin}$  bernilai 50  $N/mm^2$ , di atas  $\sigma_{fin}$  modulus elatisitas bernilai konstan.  $A$  adalah luas penampang konduktor.

$E$  adalah modulus elastisitas, yaitu modulus Young dari konduktor.

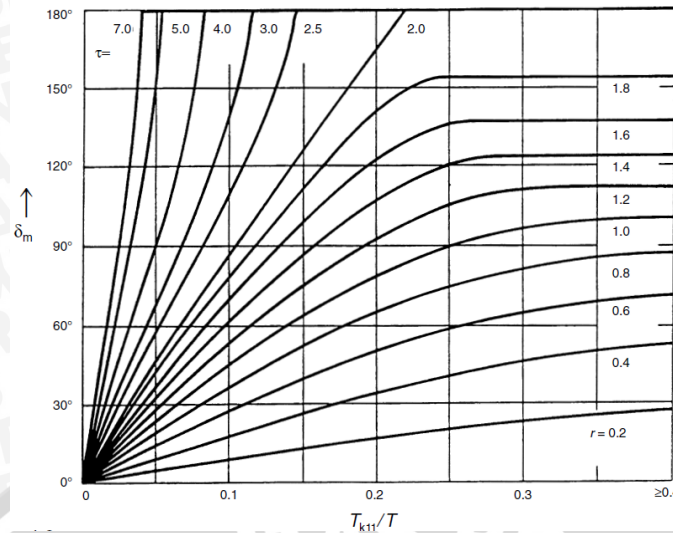
#### 2.4.2 Gaya Jatuh Busbar saat Hubung Singkat

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  $\delta_m$  yaitu ayunan konduktor selama aliran arus hubung singkat.  $\delta_m$  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).

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





Gambar 2. 19 Sudut Maksimum Ayunan  $\delta_m$  sebagai Fungsi dari Durasi Hubung Singkat yang Relevan  $T_{k11}$  berdasarkan Periode Osilasi Konduktor  $T$

Sumber: ABB (2001:136)

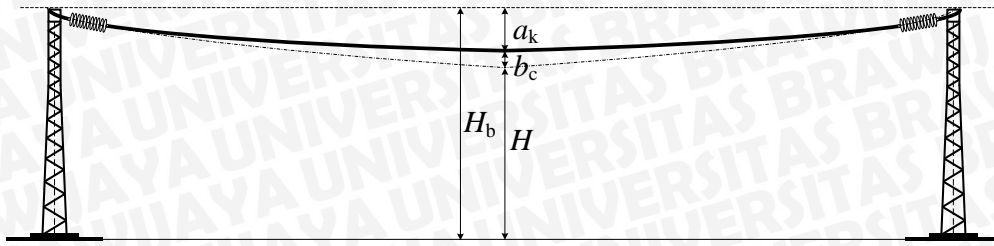
#### 2.4.3 Gaya pada Penyangga saat Hubung Singkat

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  $0^\circ$  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  $90^\circ$  (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).

$$b_c = \frac{m'g_n l^2}{8F_{st}} \quad (2-28)$$



Gambar 2. 20 Ketinggian Minimum Pemasangan *Busbar*

Sumber: ABB, 2001:519

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

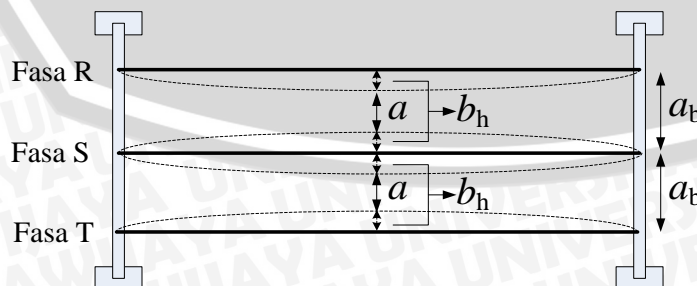
Ketinggian minimum pemasangan *busbar*  $H_b$  untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dengan mempertimbangkan andongan konduktor  $a_k$  dan andongan maksimum konduktor di tengah rentang  $b_c$  pada saat hubung singkat dihitung dengan Persamaan 2-29 berikut.

$$H_b = H + a_k + b_c \quad (2-29)$$

#### 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).

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



Gambar 2. 21 Jarak Aman Minimum Pemasangan Fasa ke Fasa *Busbar*

- $a$  : Jarak aman minimum fasa ke fasa  $a$  (mm)  
 $a_b$  : Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa *busbar* (mm)  
 $b_h$  : Ayunan maksimum konduktor di tengah rentang pada saat hubung singkat (mm)

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  $\varepsilon_{th}$  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  $\varepsilon_{ela}$  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). Gangguan hubung singkat yang sering dianggap sebagai gangguan yang paling berbahaya dibanding jenis gangguan hubung singkat yang lainnya adalah gangguan hubung singkat tiga fasa (IEC, 1976). 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).

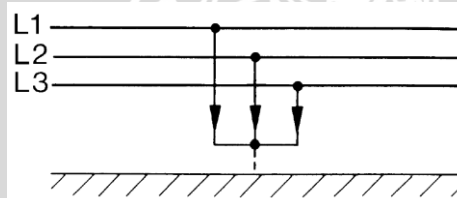
$$I_{f3 \text{ fasa}} = \frac{V_f}{Z_1} \quad (2-37)$$

Keterangan:

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

$V_f$  : Tegangan di titik gangguan sesaat sebelum terjadinya gangguan (V)

$Z_1$  : Impedansi urutan positif jaringan dilihat dari titik gangguan ( $\Omega$ )



Gambar 2. 22 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa  
Sumber: ABB, 2001:73

### 2.5.2 Impedansi Urutan Positif Ekuivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen positif ( $Z_{1eki}$ ), negatif ( $Z_{2eki}$ ), dan nol ( $Z_{0eki}$ ) dari titik gangguan sampai ke sumber sesuai dengan urutan diatas. Karena dari sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan  $Z_{1eki}$  dan  $Z_{2eki}$  dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan  $Z_{0eki}$  dimulai dari titik gangguan sampai ke trafo tenaga yang netralnya ditanahkan. Akan tetapi untuk menghitung impedansi  $Z_{0eki}$  ini, harus diketahui dulu hubungan belitan trafonya. Sehingga untuk impedansi ekuivalen jaringan dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Sarimun, 2012:168):

1. Urutan positif dan urutan negatif ( $Z_{1eki} = Z_{2eki}$ )

$$Z_{1eki} = Z_{2eki} = (n\% \times R_{1jar}) + j (X_{SC} + X_T + (n\% \times X_{1jar})) \quad (2-38)$$

Dimana:

- $Z_{1eki}$  : impedansi ekivalen jaringan urutan positif (ohm)  
 $Z_{2eki}$  : impedansi ekivalen jaringan urutan negatif (ohm)  
 $X_s$  (sisi 70 kV) : impedansi sumber sisi 70 kV (ohm)  
 $X_{t1}$  : impensi trafo tenaga urutan positif dan negatif (ohm)  
 $R_{1jar}$  : tahanan jaringan (ohm)

### 2.5.3 Impedansi Urutan Positif Transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahananannya diabaikan karena harganya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi trafo dalam ohm dihitung dengan cara sebagai berikut. Langkah pertama mencari nilai ohm pada 100% untuk trafo pada 20 kV, yaitu dengan menggunakan rumus (Sarimun, 2012:166):

$$Z_B = \frac{kV^2}{MVA} \quad (2-39)$$

Dimana:

$Z_B$  : Impedansi trafo tenaga pada 100% (ohm)

$kV^2$  : Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)

$MVA$  : Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

Reaktansi urutan positif, negatif ( $X_{t1} = X_{t2}$ )

$$X_{t1} = \text{reaktansi trafo (\%)} \times Z_B \quad (2-40)$$

Untuk trafo tenaga dengan hubungan belitan  $\Delta Y$  dimana kapasitas belitan delta sama besar dengan kapasitas belitan Y, maka :

$$X_{t0} = X_{t1} \quad (2-41)$$

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

Tabel 2. 8 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. 9 Jatuh Tegangan Ohmik Transformator

Daya teraan transformator (MVA)	6,3	12,5	31,5	>31,5
UR%	0,7-0,85	0,6-0,7	0,5-0,6	<0,5

Sumber: ABB (2001:83)

Pada transformator 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).

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

#### 2.5.4 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. 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.

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

$I_{\text{dasar}}$  : Arus dasar (A)

$kV_{\text{dasar}}$ : Tegangan dasar (kV)

MVA : Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

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

$Z_{\text{dasar}}$  : Impedansi dasar (ohm)

$kV_{\text{dasar}}$ : Tegangan dasar (kV)

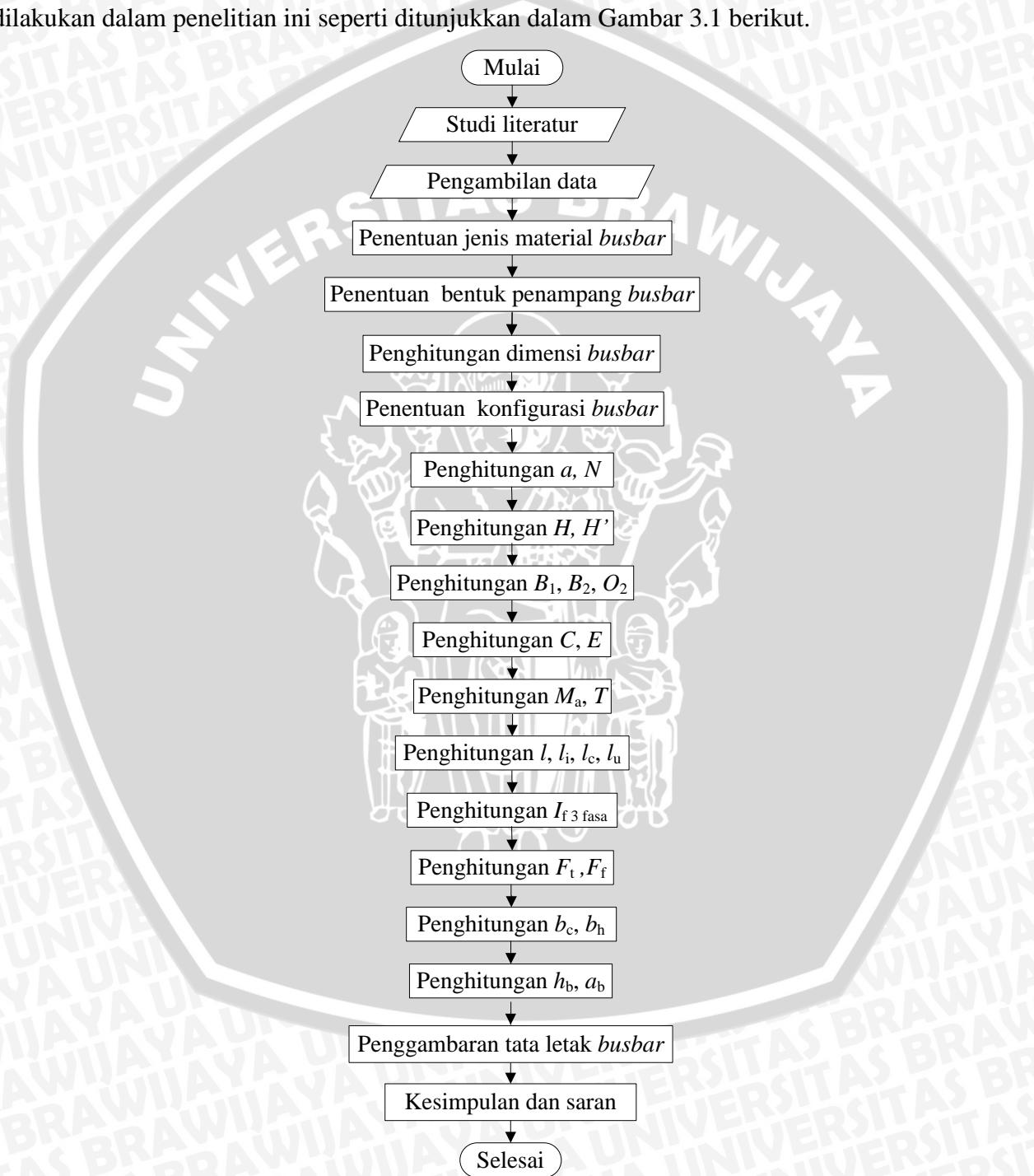
MVA : Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

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 *double busbar* 70 kV pada gardu induk Sengkaling. 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  
 $I_f$  : 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 untuk digunakan sebagai dasar teori yang menunjang penyelesaian penelitian ini dengan mengkaji literatur dari buku, jurnal, skripsi, dan internet tentang konsep-konsep yang berkaitan dengan perencanaan busbar yang meliputi analisis hubung singkat, konfigurasi busbar, material busbar, dan dimensi busbar.

### 3.2 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam penyelesaian penelitian. Data-data yang diperlukan dalam kajian ini terdiri dari data sekunder yang meliputi:



1. Diagram satu garis Gardu Induk Sengkaling.
2. Data transformator pada Gardu Induk Sengkaling.

### 3.3 Perhitungan dan Analisis

#### 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 Gardu Induk Sengkaling.

#### 2. Penentuan Bentuk Penampang *Busbar*

Penentuan bentuk penampang *busbar* dilakukan berdasarkan teori pada sub bab 2.1.2 yang disesuaikan dengan keadaan Gardu Induk Sengkaling.

#### 3. Penghitungan Dimensi *Busbar*

- a. Penghitungan arus nominal tiga fasa pada *busbar* dengan Persamaan 2-2.
- b. Penghitungan kemampuan hantar arus *busbar* dengan Persamaan 2-1.
- c. 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 Gardu Induk Sengkaling.

#### 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, 2-7, dan 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 2.14.

- 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 transformator dengan Persamaan 2-39 dan 2-40.
  - c. Penghitungan impedansi urutan positif ekivalen jaringan dengan Persamaan 2-38.
  - d. Penghitungan arus hubung singkat tiga fasa dengan Persamaan 2-37.
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 modulus 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 Gardu Induk Sengkaling.

## 12. Penghitungan Ayunan Maksimum *Busbar* saat Hubung Singkat

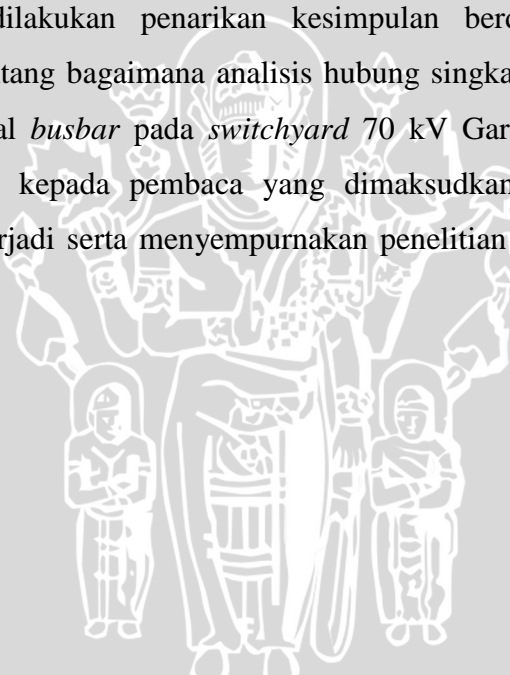
- a. Penghitungan perluasan konduktor elastis dengan Persamaan 2-34.
- b. Penghitungan perluasan konduktor panas dengan Persamaan 2-33.
- c. Penghitungan faktor  $C_F$  dengan Persamaan 2-31.
- d. Penghitungan faktor  $C_D$  dengan Persamaan 2-32.
- e. Penghitungan ayunan maksimum *busbar* di tengah 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

### **Kesimpulan dan Saran**

Pada tahapan ini dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan, dan analisis tentang bagaimana analisis hubung singkat, konfigurasi *busbar*, dimensi *busbar*, dan material *busbar* pada *switchyard* 70 kV Gardu Induk Sengkaling. Kemudian pemberian saran kepada pembaca yang dimaksudkan untuk memperbaiki kesalahan-kesalahan yang terjadi serta menyempurnakan penelitian untuk pengembangan di masa mendatang.





## BAB IV

### PERENCANAAN *BUSBAR* PADA LATAR HUBUNG 70 kV DI GARDU INDUK SENGKALING

Pada bab ini akan dibahas mengenai perencanaan *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling. Beberapa hal yang akan dibahas adalah Gardu Induk Sengkaling 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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.

#### 4.1. Gardu Induk Sengkaling

Gardu Induk Sengkaling merupakan salah satu gardu induk yang dikelola dibawah wewenang PT PLN APP Malang. Gardu Induk Sengkaling terletak di Jalan Dadap Tulis Utara No.109, Dadaprejo, Junrejo, Kota Batu, Jawa Timur, memiliki 4 buah transformator, 2 buah transformator 150/70 kV serta 2 buah transformator 150/20 kV. GI Sengkaling terletak pada ketinggian 622 mdpl (<1000 mdpl), sehingga tidak perlu faktor koreksi untuk peralatan listrik tegangan tinggi.

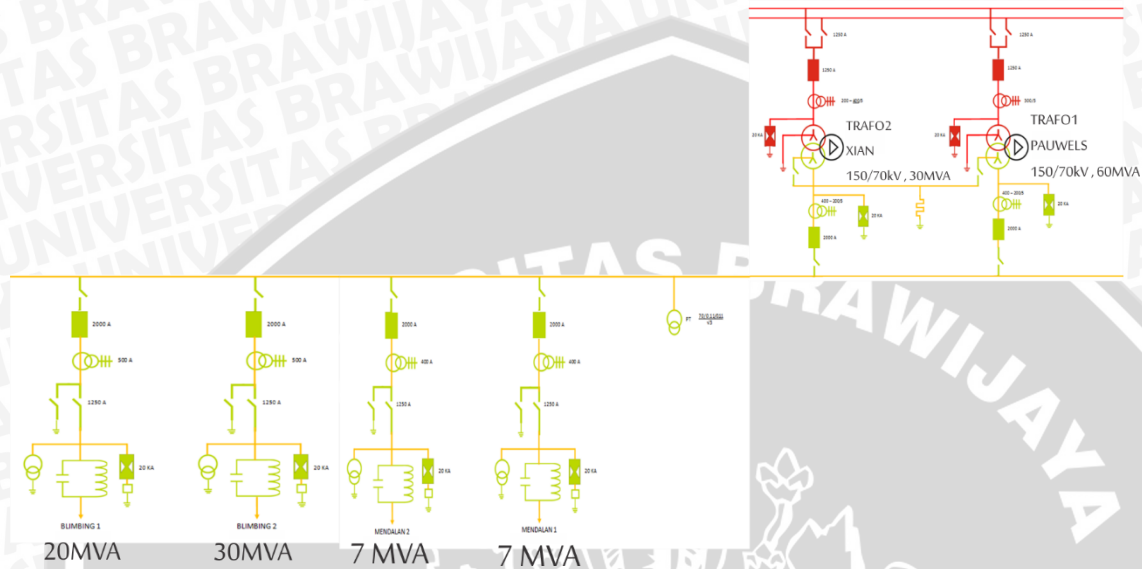


Gambar 4. 1 Letak Gardu Induk Sengkaling

Sumber: Google Earth

#### 4.1.1 Sistem 70 kV Gardu Induk Sengkaling Sebelum Perencanaan Double Busbar

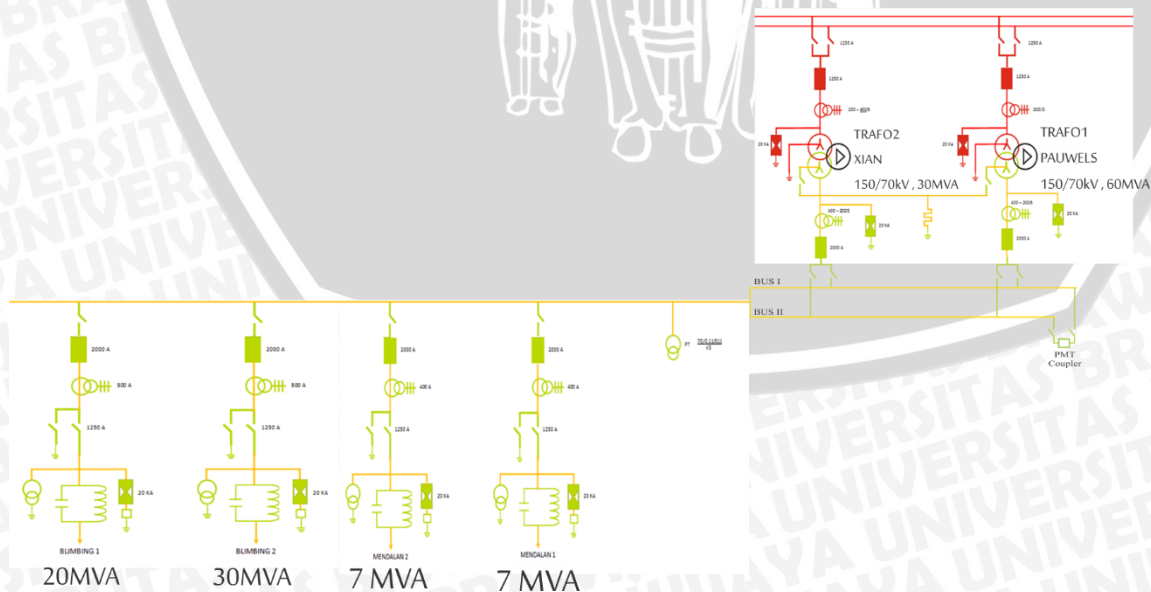
Sistem 70 kV Gardu Induk Sengkaling menyuplai Gardu Induk Mendalan dan Gardu Induk Blimbing. Arus nominalnya sebesar 742,3 A, namun sejauh ini arus maksimal yang pernah dicapai sebesar 45% dari arus nominal .



Gambar 4. 2 Single Line Diagram Gardu Induk Sengkaling dengan *Single Busbar*

#### 4.1.2 Sistem 70 kV Gardu Induk Sengkaling Setelah Perencanaan Double Busbar

Dalam penelitian ini, setelah menggunakan *double busbar* arus nominal yang mengalir terbagi menjadi dua sehingga masing-masing busbar dialiri arus sebesar 371,15 A. Ketika salah satu busbar perlu pemeliharaan maka PMT kopel dibuka sehingga arus sepenuhnya mengalir melalui salah satu busbar.



Gambar 4. 3 Single Line Diagram Gardu Induk Sengkaling dengan *Double Busbar*

#### 4.2. Penentuan Jenis Material, Bentuk Penampang, dan Dimensi *Busbar* pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling

Penentuan material *busbar*, bentuk penampang *busbar*, dan dimensi *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling adalah sebagai berikut.

##### 4.2.1 Penentuan Jenis Material *Busbar* pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling

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. 1 Perbandingan Bahan Konduktor

Bahan	Massa jenis	$\alpha(0-100^{\circ}) \times 10^{-6}$	Titik leleh	Titik didih	konduktivitas	Kekuatan tarik
Aluminium	2,7	23,86	697,5	2447	0,57	20-30
Tembaga	8,96	16,86	1083	2595	0,94	40
Baja	7,7	10,5-13,2	1170-1530	-	0,11	37-64

Berdasarkan Tabel 2.1, 2.2, dan 4.1, maka jenis material *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling 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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling. 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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling

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. 2 Keuntungan dan Kerugian Bentuk Penampang *Busbar*

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

Berdasarkan Tabel 4.2, maka bentuk penampang *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling 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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling

Total daya semu dari dua buah transformator di Gardu Induk Sengkaling adalah 90 MVA.



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

$$I_n = \frac{S_3 \text{ fasa}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL}} = \frac{S_{\text{total transformator}}}{\sqrt{3} \cdot V_{LL} \text{ sekunder transformator}} = \frac{90 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 70 \text{ kV}} = 742,3 \text{ A}$$

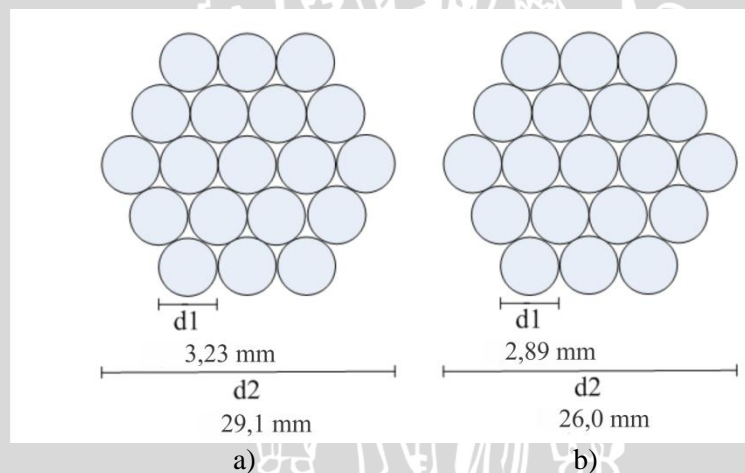
Kemampuan hantar arus busbar dihitung dengan Persamaan 2-1 sebagai berikut.

$$KHA = 1,25 \cdot I_n = 1,25 \cdot 742,307 = 927,884 \text{ A}$$

Berdasarkan kemampuan hantar arus busbar dan Tabel 2.3 maka dimensi busbar kawat pilin aluminium dan tembaga pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling ditentukan seperti ditampilkan pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.3 berikut.

Tabel 4. 3 Dimensi Busbar Kawat Pilin Aluminium dan Tembaga Gardu Induk Sengkaling

Parameter	Material	
	Aluminium	Tembaga
Jumlah pilin konduktor	61	61
Diameter masing-masing pilin (mm)	3,23	2,89
Diameter total (mm)	29,1	26,0
Luas penampang konduktor (mm <sup>2</sup> )	499,83	400,14
Arus kontinu (A)	960	960



Gambar 4. 4 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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling

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.

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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling 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

Gardu Induk Sengkaling memasok listrik ke daerah sekitar Kota Batu dan menyuplai Gardu Induk Blimbing serta Gardu Induk Mendalan . Konfigurasi dua bus-satu pemutus daya dipilih karena sudah memiliki keandalan sedang namun tidak terlalu kompleks dan tidak membutuhkan terlalu banyak komponen. Keandalan yang sedang dibutuhkan karena Gardu Induk Sengkaling akan memasok pemukiman masyarakat serta kawasan wisata Kota Batu.

## 4.4. Penghitungan Parameter Tata Letak *Busbar*

### 4.4.1 Penghitungan Jarak Aman Minimum Bagian Aktif *Busbar*

Sesuai Tabel 2.5 untuk sistem 70 kV jarak aman minimum antar bagian aktif fasa ke fasa *busbar a* dan antar bagian aktif fasa ke bumi *N* pada latar hubung adalah 750 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.

$$\begin{aligned} H &= N + 2440 \text{ mm} \\ &= 750 \text{ mm} + 2440 \text{ mm} \\ &= 3190 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H' &= N + 4500 \text{ mm} \\ &= 750 \text{ mm} + 4500 \text{ mm} \\ &= 5250 \text{ mm} \end{aligned}$$

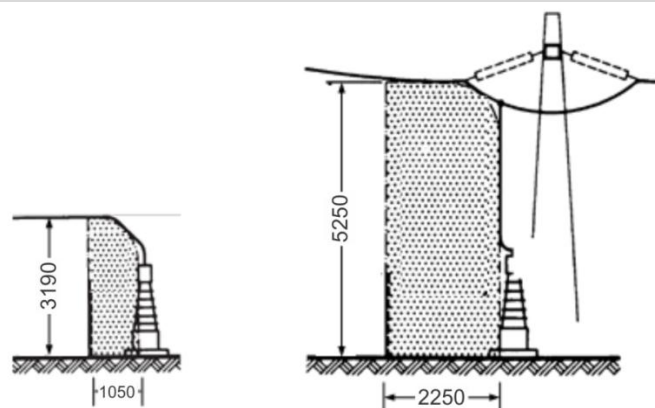
Ketinggian minimum di dalam instalasi ditunjukkan dalam Gambar 4.5a dan 4.6 dan ketinggian minimum di luar instalasi seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.5b.

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

$$\begin{aligned} O_2 &= N + 300 \text{ mm} \\ &= 750 \text{ mm} + 300 \text{ mm} \\ &= 1050 \text{ mm} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} E &= N + 1500 \text{ mm} \\ &= 750 \text{ mm} + 1500 \text{ mm} \\ &= 2250 \text{ mm} \end{aligned}$$



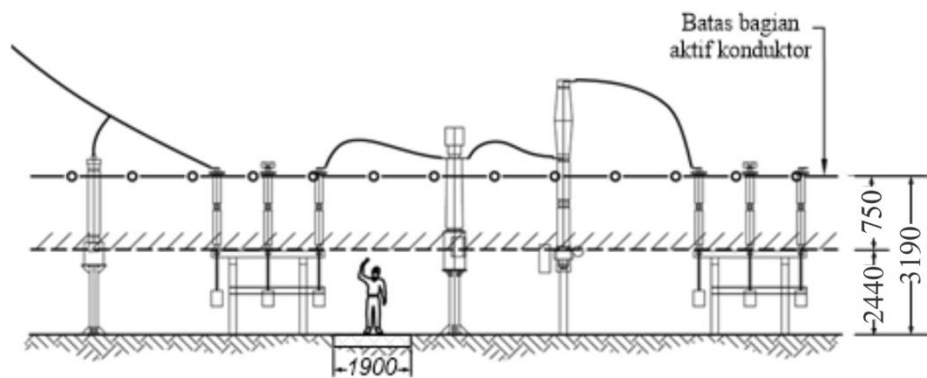
a. Bagian dalam instalasi

b. Bagian luar instalasi

Gambar 4. 5 Pembatas dan Ketinggian pada Instalasi

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.

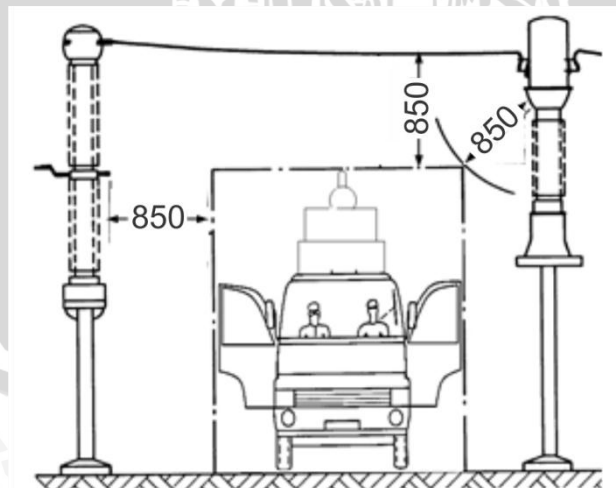


Gambar 4. 6 Ketinggian Peralatan-Peralatan Latar Hubung 70 kV Gardu Induk Sengkaling

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.

$$T = N + 100 = 750 \text{ mm} + 100 \text{ mm} = 850 \text{ mm}$$

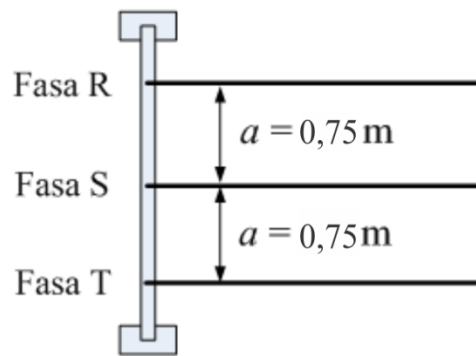
$$T' = T + (2 \cdot 2500 \text{ mm}) = 850 \text{ mm} + (2 \cdot 2500) = 5850 \text{ mm}$$



Gambar 4. 7 Jarak Aman Minimum Transportasi Latar Hubung Luar Ruangan

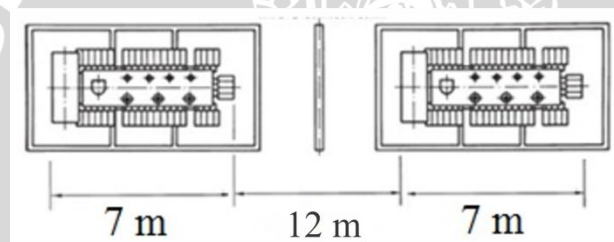
#### 4.4.2 Penghitungan Panjang Busbar

Jarak aman minimum fasa ke fasa saluran ditentukan sesuai Tabel 2.5. Untuk sistem 70 kV jarak aman minimum fasa ke fasa  $a$  adalah 0,75 m seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4. 8 Jarak Aman Fasa ke Fasa Lantar Hubung 70 kV Gardu Induk Sengkaling

Jarak aman minimum antar saluran terdapat jarak aman minimum antar transformator  $a_{T-T}$  yang dipasang di dinding perlindungan kebakaran sesuai Tabel 2.7. Untuk sistem 60 MVA jarak aman minimum antar transformator ditentukan adalah 12 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 Lantar Hubung 70 kV GI Sengkaling

Jarak masing-masing saluran  $l_s$  dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} l_s &= a_{T-T} + l_T \\ &= 12 \text{ m} + 7 \text{ m} \\ &= 19 \text{ m} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} l &= 2 \times l_s \\ &= 2 \times 19 \text{ m} \\ &= 38 \text{ m} \end{aligned}$$

Tinggi rantai isolator ditentukan 146 mm. Jumlah rantai isolator ditentukan sesuai dengan Tabel 2.6. Untuk sistem 70 kV jumlah rantai isolator adalah 6 rantai. Panjang isolator rantai  $l_i$  dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 l_i &= 6 \times 146 \text{ mm} \\
 &= 876 \text{ mm} \\
 &= 0,876 \text{ m}
 \end{aligned}$$

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

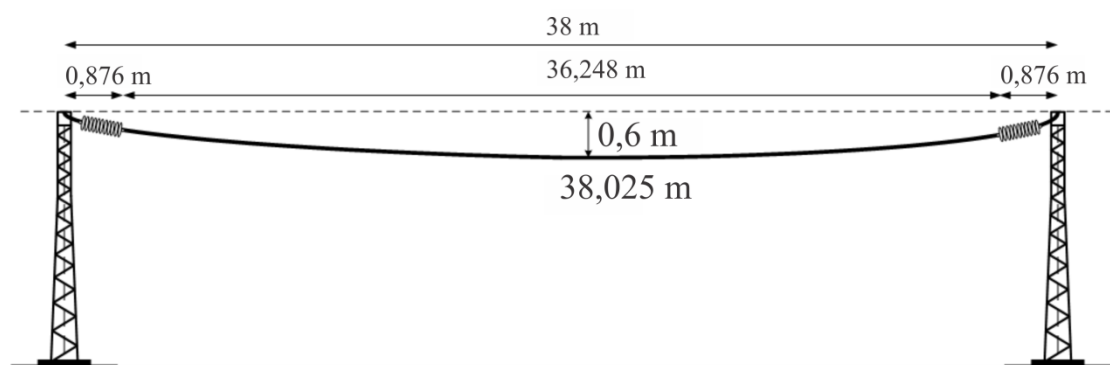
$$\begin{aligned}
 l &= l_c + 2l_i \\
 l_c &= l - 2l_i \\
 l_c &= 38 \text{ m} - 2(0,876 \text{ m}) \\
 &= 38 \text{ m} - 1,752 \text{ m} \\
 &= 36,248 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Andongan busbar terbesar  $a_k$  pada latar hubung 70 kV Gardu Induk Sengkaling pada suhu busbar  $+80^\circ\text{C}$  dengan nilai tegangan 70 kV, panjang busbar dan isolator rantai 38 m, dan luas penampang busbar aluminium  $499,83 \text{ mm}^2$  dan tembaga  $400,14 \text{ mm}^2$  ditentukan dengan Gambar 2.14 kondisi nomor 5 yaitu 0,6 m.

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

$$\begin{aligned}
 l_u &= l + \frac{8 \cdot (a_k)^2}{3 \cdot l} \\
 &= 38 + \frac{8 \cdot (0,6)^2}{3 \cdot 38} \\
 &= 38,025 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Gambar  $l_c$ ,  $l_i$ ,  $l$ , dan  $l_u$  busbar pada latar hubung 70 kV Gardu Induk Sengkaling seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Panjang Busbar dengan Andongan

#### 4.5. Analisis Hubung Singkat Tiga Fasa Busbar pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling

##### 4.5.1 Penentuan Nilai Dasar

Nilai dasar yang ditentukan adalah tegangan dasar dan daya dasar. Tegangan dasar (kV dasar) ditentukan 150 kV yang merupakan tegangan pada sisi primer transformator pada Gardu Induk Sengkaling dan daya dasar (MVA dasar) ditentukan 60 MVA yang merupakan kapasitas daya transformator pada Gardu Induk Sengkaling.

##### 4.5.2 Impedansi Sumber

Impedansi sumber dapat dihitung dengan memasukkan data dari data Transformator I dan II Gardu Induk Sengkaling, yaitu tegangan sisi primer trafo tenaga 150 kV dan kapasitas daya transformator yaitu 60 MVA dan 30 MVA kedalam persamaan (2.6). Karena R transformator sangat kecil maka dapat diabaikan, sehingga impedansi sama dengan reaktansi atau  $Z=X$ . Tegangan dasar yang digunakan adalah 150 kV dan MVA dasar adalah 60 MVA.

Maka impedansi dasar ( $X_s$ ) adalah:

$$X_{S1}(\text{sisi } 150 \text{ kV}) = \frac{\text{kV}^2}{\text{MVA}} = \frac{\left(\frac{150}{150}\right)^2}{\left(\frac{60}{60}\right)} = 1 \text{ pu}$$

Untuk mengetahui nilai impedansi di sisi sekunder (yaitu di bus 70 kV) harus dikonversi dulu ke sisi sekunder, menggunakan persamaan (2-39).

Maka impedansi disisi 70 kV adalah:

$$\begin{aligned} X_S(\text{sisi } 70 \text{ kV})_1 &= \frac{70^2}{150^2} \times X_S(\text{sisi } 150 \text{ kV}) \\ &= \frac{70^2}{150^2} \times 1 \\ &= 0,218 \text{ pu} \end{aligned}$$

Sedangkan untuk transformator II,

$$X_{S2}(\text{sisi } 150 \text{ kV}) = \frac{\text{kV}^2}{\text{MVA}} = \frac{\left(\frac{150}{150}\right)^2}{\left(\frac{30}{60}\right)} = 2 \text{ pu}$$

Maka impedansi disisi 70 kV adalah:

$$\begin{aligned} X_S(\text{sisi } 70 \text{ kV})_2 &= \frac{70^2}{150^2} \times X_S(\text{sisi } 150 \text{ kV}) \\ &= \frac{70^2}{150^2} \times 2 \\ &= 0,435 \text{ pu} \end{aligned}$$



#### 4.5.3 Impedansi Urutan Positif Transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah nilai reaktansinya, sedangkan tahanannya diabaikan karena harganya kecil. Besarnya reaktansi transformator I dan II di Gardu Induk Sengkaling adalah 12,63 % dan 10,66%, agar dapat mengetahui besarnya reaktansi urutan positif maka perlu dihitung dulu besar ohm pada 100 %nya. Yaitu kedalam persamaan rumus (2-39).

Besar nilai ohm pada 100 % yaitu:

$$Z_{B1} = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{70^2}{60} = 81,67 \text{ ohm}$$

Dalam per unit adalah,

$$Z_{B1} = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{\left(\frac{70}{150}\right)^2}{\left(\frac{60}{60}\right)} = 1,96 \text{ pu}$$

Nilai impedansi trafo tenaga adalah:

Impedansi urutan positif  $X_{t1}$  dengan menggunakan persamaan 2-40.

$$X_{t1} = \text{reaktansi trafo (\%)} \times Z_B$$

$$X_{t1} = 12,63 \% \times 1,96 = j 0,247 \text{ pu}$$

Sedangkan untuk transformator II,

$$Z_{B2} = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{\left(\frac{70}{150}\right)^2}{\left(\frac{30}{60}\right)} = 0,435 \text{ pu}$$

Impedansi urutan positif  $X_{t2}$  dengan menggunakan persamaan 2-40.

$$X_{t2} = \text{reaktansi trafo (\%)} \times Z_B$$

$$X_{t2} = 10,66 \% \times 1,96 = j 0,046 \text{ pu}$$

Hasil perhitungan impedansi sumber dan impedansi urutan positif ditunjukkan pada

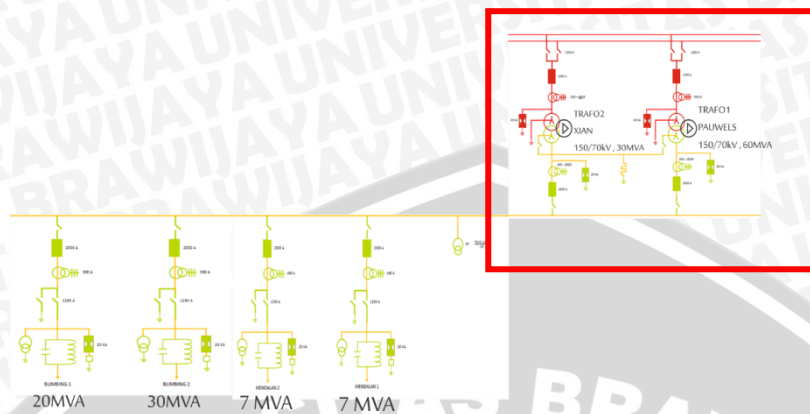
Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Impedansi Sumber dan Impedansi Urutan Positif Sistem 70 kV Gardu Induk Sengkaling

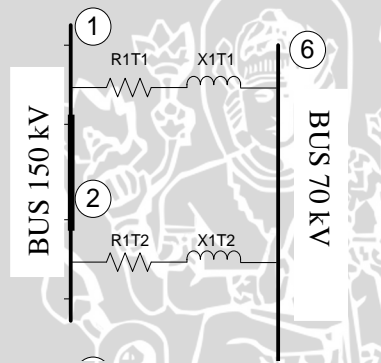
No.	Impedansi Sumber ( $X_S$ sisi 70 kV)	Reaktansi urutan positif ( $X_T$ )
1	j 0,218 pu	j 0,247 pu
2	j 0,435 pu	j 0,046 pu

Sumber : Hasil perhitungan

#### 4.5.4 Penghitungan Impedansi Urutan Positif Ekivalen Jaringan



Gambar 4.11 Single Line Diagram 70 kV Gardu Induk Sengkaling



Gambar 4.12 Rangkaian Impedansi Urutan Positif

Perhitungan besarnya nilai impedansi ekivalen urutan positif menggunakan persamaan (2.38):

$$Z_{eki} = (n\% \times R_{Ijar}) + j(X_S + X_{T1} + (n\% \times X_{Ijar}))$$

R dan X jaringan diabaikan, sehingga hanya perlu menjumlahkan impedansi sumber dan impedansi transformator,

$$\begin{aligned} Z_{1eki} &= \frac{(j0,218 + j0,247) \times (j0,435 + j0,046)}{(j0,218 + j0,247) + (j0,435 + j0,046)} \\ &= j 0,236 \text{ pu} \end{aligned}$$

#### 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 yang digunakan yaitu 150 kV. Arus hubung singkat tiga fasa dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-37 sebagai berikut.

$$I_{hs} \text{ (pu)} = \frac{V_f}{Z_1} = \frac{\left(\frac{150}{150}\right)}{j0,236} = -j4,237 \text{ pu}$$

Kemudian setelah didapatkan nilai arus hubung singkat dalam satuan per-unit, arus hubung singkat dikonversikan ke satuan ampere menggunakan Persamaan 2-43 dengan  $MVA_{\text{dasar}} 60 \text{ MVA}$  dan  $V_{\text{dasar}} 150 \text{ kV}$ .  $I_{\text{dasar}}$  dapat dihitung sebagai berikut.

$$I_{\text{dasar}} = \frac{MVA_{\text{dasar}}}{\sqrt{3} \cdot kV_{\text{dasar}}} = \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 150 \text{ kV}} = 230,9401 \text{ A}$$

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

$$\begin{aligned} I_{hs} \text{ (A)} &= I_{hs} \text{ (pu)} \cdot I_{\text{dasar}} \\ &= -j4,237 \text{ pu} \cdot 230,9401 \text{ A} \\ &= -j978,49 \text{ A} = 978,49 \angle -90,0^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa arus hubung singkat tiga fasa busbar pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling adalah sebesar  $978,49 \angle -90,0^\circ \text{ A}$ .

#### 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.

$$m'_{\text{al}} = 1,379 + 1,431 = 2,810 \text{ kg/m}$$

$$m'_{\text{cu}} = 3,640 + 1,431 = 5,071 \text{ kg/m}$$

Komponen horizontal tarikan busbar statis  $F_{st}$  untuk suhu minimum  $-20^\circ \text{C}$  bernilai 12126,4 N dan untuk suhu operasional maksimum  $+60^\circ \text{C}$  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  $-20^\circ \text{C}$  dan maksimum  $+60^\circ \text{C}$  dihitung dengan Persamaan 2-28 berikut.

$$b_{c \text{ al } -20^\circ \text{C}} = \frac{m'_{\text{al}} g_n l^2}{8F_{st-20^\circ \text{C}}} = \frac{2,810 \cdot 9,80665 \cdot (38)^2}{8 \cdot 12126,4} = 0,41 \text{ m}$$

$$b_{c \text{ al } +60^\circ \text{C}} = \frac{m'_{\text{al}} g_n l^2}{8F_{st+60^\circ \text{C}}} = \frac{2,810 \cdot 9,80665 \cdot (38)^2}{8 \cdot 11370,4} = 0,44 \text{ m}$$

$$b_{c\text{ cu} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{m'_{\text{cu}} g_n l^2}{8F_{st-20\text{ }^{\circ}\text{C}}} = \frac{5,071 \cdot 9,80665 \cdot (38)^2}{8 \cdot 12126,4} = 0,74\text{ m}$$

$$b_{c\text{ cu} + 60\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{m'_{\text{cu}} g_n l^2}{8F_{st+60\text{ }^{\circ}\text{C}}} = \frac{5,071 \cdot 9,80665 \cdot (38)^2}{8 \cdot 11370,4} = 0,79\text{ m}$$

Nilai maksimum andongan *busbar* di tengah rentang  $b_c$  saat hubung singkat pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling untuk masing-masing material aluminium dan tembaga terletak pada suhu operasional maksimum  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  sebagai berikut.

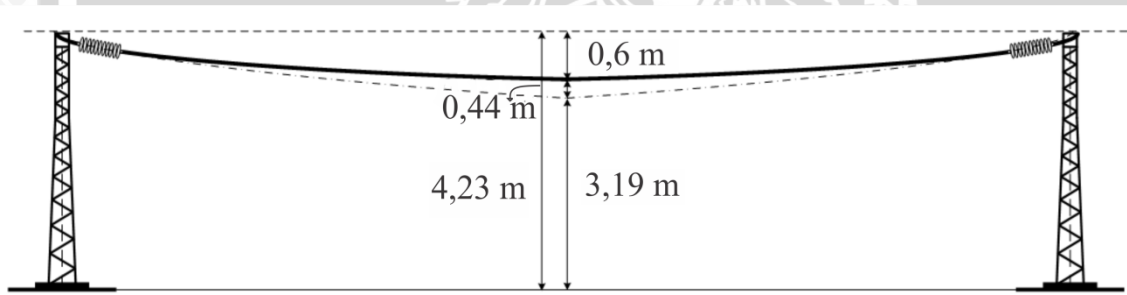
$$b_{c\text{ al}} = 0,44\text{ m}$$

$$b_{c\text{ cu}} = 0,79\text{ m}$$

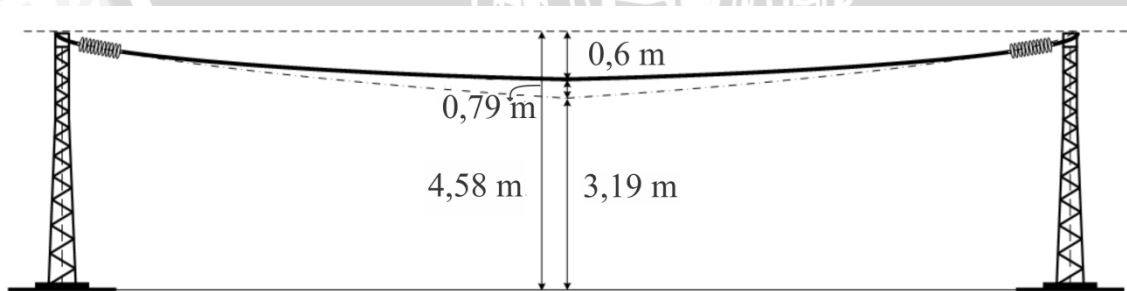
Ketinggian minimum pemasangan *busbar*  $H_b$  untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dengan mempertimbangkan andongan maksimum *busbar* di tengah rentang  $b_c$  pada saat hubung singkat ditunjukkan dalam Gambar 4.13 dan 4.14 yang dihitung dengan Persamaan 2-29 berikut.

$$H_{b\text{ al}} = H + a_k + b_{c\text{ al}} = 3,19 + 0,6 + 0,44 = 4,23\text{ m}$$

$$H_{b\text{ cu}} = H + a_k + b_{c\text{ cu}} = 3,19 + 0,6 + 0,79 = 4,58\text{ m}$$



Gambar 4. 13 Ketinggian Minimum Pemasangan *Busbar* untuk Material Aluminium



Gambar 4. 14 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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling.  $I''_{k2}$  dihitung dengan Persamaan 2-21 berikut.

$$I''_{k2} = 0,75 \cdot I''_{k3} = 0,75 \cdot (978,49\text{ A})^2 = 0,717(\text{kA})^2$$

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

$$F' = k \cdot \frac{I''^2}{a} \cdot \frac{l_c}{l} = 5,055 \text{ N/kA}^2 \cdot \frac{0,717 \text{ kA}^2}{0,75 \text{ m}} \cdot \frac{36,248 \text{ m}}{38 \text{ m}} = 4,61 \text{ N/m}$$

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

$$r_{\text{al}} = \frac{F'}{g_n m'_{\text{al}}} = \frac{4,61}{9,80665 \cdot 2,810} = 0,17$$

$$r_{\text{cu}} = \frac{F'}{g_n m'_{\text{cu}}} = \frac{4,61}{9,80665 \cdot 5,071} = 0,09$$

Arah gaya resultan pada busbar  $\delta_1$  untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dihitung dengan Persamaan 2-23 sebagai berikut.

$$\delta_{1 \text{ al}} = \arctan r_{\text{al}} = \arctan 0,17 = 9,65^\circ$$

$$\delta_{1 \text{ cu}} = \arctan r_{\text{cu}} = \arctan 0,09 = 5,14^\circ$$

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

$$T_{\text{al} - 20^\circ\text{C}} = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_{c \text{ al} - 20^\circ\text{C}}}{g_n}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{0,8 \frac{0,41}{9,80665}} = 1,15 \text{ s}$$

$$T_{\text{al} + 60^\circ\text{C}} = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_{c \text{ al} + 60^\circ\text{C}}}{g_n}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{0,8 \frac{0,44}{9,80665}} = 1,19 \text{ s}$$

$$T_{\text{cu} - 20^\circ\text{C}} = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_{c \text{ cu} - 20^\circ\text{C}}}{g_n}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{0,8 \frac{0,74}{9,80665}} = 1,54 \text{ s}$$

$$T_{\text{cu} + 60^\circ\text{C}} = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_{c \text{ cu} + 60^\circ\text{C}}}{g_n}} = 2 \cdot 3,14 \sqrt{0,8 \frac{0,79}{9,80665}} = 1,59 \text{ s}$$

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

$$T_{k11 \text{ al} - 20^\circ\text{C}} = 0,4 \cdot T_{\text{al} - 20^\circ\text{C}} = 0,4 \cdot 1,15 \text{ s} = 0,46 \text{ s}$$

$$T_{k11 \text{ al} + 60^\circ\text{C}} = 0,4 \cdot T_{\text{al} + 60^\circ\text{C}} = 0,4 \cdot 1,19 \text{ s} = 0,47 \text{ s}$$

$$T_{k11 \text{ cu} - 20^\circ\text{C}} = 0,4 \cdot T_{\text{cu} - 20^\circ\text{C}} = 0,4 \cdot 1,54 \text{ s} = 0,62 \text{ s}$$

$$T_{k11 \text{ cu} + 60^\circ\text{C}} = 0,4 \cdot T_{\text{cu} + 60^\circ\text{C}} = 0,4 \cdot 1,59 \text{ s} = 0,64 \text{ s}$$

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.

$$\begin{aligned} T_{res\ al\ -20\text{ }^{\circ}\text{C}} &= \frac{T_{al\ -20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{\sqrt[4]{1+r_{al}^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2 (\delta_{1\ al})^2}{64 \left( \frac{90^{\circ}}{90^{\circ}} \right)^2} \right]} \\ &= \frac{1,15}{\sqrt[4]{1+(0,17)^2} \left[ 1 - \frac{(3,14)^2 (9,65^{\circ})^2}{64 \left( \frac{90^{\circ}}{90^{\circ}} \right)^2} \right]} \\ &= 1,14\text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{res\ al\ +60\text{ }^{\circ}\text{C}} &= \frac{T_{al\ +60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{\sqrt[4]{1+r_{al}^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2 (\delta_{1\ al})^2}{64 \left( \frac{90^{\circ}}{90^{\circ}} \right)^2} \right]} \\ &= \frac{1,19}{\sqrt[4]{1+(0,17)^2} \left[ 1 - \frac{(3,14)^2 (9,65^{\circ})^2}{64 \left( \frac{90^{\circ}}{90^{\circ}} \right)^2} \right]} \\ &= 1,18\text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{res\ cu\ -20\text{ }^{\circ}\text{C}} &= \frac{T_{cu\ -20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{\sqrt[4]{1+r_{cu}^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2 (\delta_{1\ cu})^2}{64 \left( \frac{90^{\circ}}{90^{\circ}} \right)^2} \right]} \\ &= \frac{1,54}{\sqrt[4]{1+(0,09)^2} \left[ 1 - \frac{(3,14)^2 (5,14^{\circ})^2}{64 \left( \frac{90^{\circ}}{90^{\circ}} \right)^2} \right]} \\ &= 1,54\text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{res\ cu\ +60\text{ }^{\circ}\text{C}} &= \frac{T_{cu\ +60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{\sqrt[4]{1+r_{cu}^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2 (\delta_{1\ cu})^2}{64 \left( \frac{90^{\circ}}{90^{\circ}} \right)^2} \right]} \\ &= \frac{1,59}{\sqrt[4]{1+(0,09)^2} \left[ 1 - \frac{(3,14)^2 (5,14^{\circ})^2}{64 \left( \frac{90^{\circ}}{90^{\circ}} \right)^2} \right]} \\ &= 1,59\text{ s} \end{aligned}$$

$\frac{T_{res}}{4}$  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.

$$\frac{T_{res\ al\ -20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} = \frac{1,14}{4} = 0,29\text{ s}$$

$$\frac{T_{res\ al\ +60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} = \frac{1,18}{4} = 0,30\text{ s}$$

$$\frac{T_{res\ cu\ -20\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} = \frac{1,54}{4} = 0,39\text{ s}$$

$$\frac{T_{res\ cu\ +60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{4} = \frac{1,59}{4} = 0,4\text{ s}$$

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

$$\phi_{al} = 3(\sqrt{1+r_{al}^2} - 1) = 3(\sqrt{1+(0,17)^2} - 1) = 0,042$$

$$\varphi_{cu} = 3(\sqrt{1 + r_{cu}^2} - 1) = 3(\sqrt{1 + (0,09)^2} - 1) = 0,013$$

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.

$$E_{al} = 55 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_{cu} = 100 \text{ kN/mm}^2$$

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

$$\frac{F_{st} - 20^\circ\text{C}}{A_{al}} = \frac{12126,4}{499,83} = 24,26 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{F_{st} + 60^\circ\text{C}}{A_{al}} = \frac{11370,4}{499,83} = 22,75 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{F_{st} - 20^\circ\text{C}}{A_{cu}} = \frac{12126,4}{400,14} = 30,31 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{F_{st} + 60^\circ\text{C}}{A_{cu}} = \frac{11370,4}{400,14} = 28,42 \text{ N/mm}^2$$

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

$$\begin{aligned} E_{s\ al} - 20^\circ\text{C} &= E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{st} - 20^\circ\text{C}}{A_{al} \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] \\ &= 55000 \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{12126,4}{499,83 \cdot 50} 90^\circ \right) \right] = 43065 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{s\ al} + 60^\circ\text{C} &= E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{st} + 60^\circ\text{C}}{A_{al} \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] \\ &= 55000 \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{11370,4}{499,83 \cdot 50} 90^\circ \right) \right] = 41525 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{s\ cu} - 20^\circ\text{C} &= E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{st} - 20^\circ\text{C}}{A_{cu} \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] \\ &= 100000 \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{12126,4}{400,14 \cdot 50} 90^\circ \right) \right] = 86700 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{s\ cu} + 60^\circ\text{C} &= E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{st} + 60^\circ\text{C}}{A_{cu} \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] \\ &= 100000 \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{11370,4}{400,14 \cdot 50} 90^\circ \right) \right] = 84600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

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

$$N_{al-20^{\circ}C} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{E_{sal} A_{al}} = \frac{1}{500 \cdot 38000} + \frac{1}{44631 \cdot 499,83} = 99,09 \cdot 10^{-9}$$

$$N_{al+60^{\circ}C} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{E_{sal} A_{al}} = \frac{1}{500 \cdot 38000} + \frac{1}{43035 \cdot 499,83} = 100,81 \cdot 10^{-9}$$

$$N_{cu-20^{\circ}C} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{E_{scu} A_{cu}} = \frac{1}{500 \cdot 38000} + \frac{1}{91035 \cdot 400,14} = 81,46 \cdot 10^{-9}$$

$$N_{cu+60^{\circ}C} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{E_{scu} A_{cu}} = \frac{1}{500 \cdot 38000} + \frac{1}{88830 \cdot 400,14} = 82,17 \cdot 10^{-9}$$

Faktor tekanan busbar utama  $\zeta$  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.

$$\zeta_{al-20^{\circ}C} = \frac{(g_n m'_{al} l)^2}{24 (F_{st} - 20^{\circ}C)^3 N} = \frac{(9,80665 \cdot 2,81 \cdot 38)^2}{24 \cdot (12126,4)^3 \cdot 97,46 \cdot 10^{-9}} = 0,259$$

$$\zeta_{al+60^{\circ}C} = \frac{(g_n m'_{al} l)^2}{24 (F_{st} + 60^{\circ}C)^3 N} = \frac{(9,80665 \cdot 2,81 \cdot 38)^2}{24 \cdot (11370,4)^3 \cdot 99,12 \cdot 10^{-9}} = 0,308$$

$$\zeta_{cu-20^{\circ}C} = \frac{(g_n m'_{cu} l)^2}{24 (F_{st} - 20^{\circ}C)^3 N} = \frac{(9,80665 \cdot 5,071 \cdot 38)^2}{24 \cdot (12126,4)^3 \cdot 80,08 \cdot 10^{-9}} = 1,024$$

$$\zeta_{cu+60^{\circ}C} = \frac{(g_n m'_{cu} l)^2}{24 (F_{st} + 60^{\circ}C)^3 N} = \frac{(9,80665 \cdot 5,071 \cdot 38)^2}{24 \cdot (11370,4)^3 \cdot 80,77 \cdot 10^{-9}} = 1,232$$

Faktor reaksi rentang  $\psi$  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.

$$\psi_{al-20^{\circ}C} = 0,34$$

$$\psi_{al+60^{\circ}C} = 0,39$$

$$\psi_{cu-20^{\circ}C} = 0,66$$

$$\psi_{cu+60^{\circ}C} = 0,70$$

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.

$$\begin{aligned} F_{tal-20^{\circ}C} &= F_{st-20^{\circ}C} \cdot (1 + \varphi_{al} \cdot \psi_{al-20^{\circ}C}) \\ &= 12126,4 \cdot (1 + 0,042 \cdot 0,34) \\ &= 12298,3 \text{ N} \end{aligned}$$

$$F_{tal+60^{\circ}C} = F_{st+60^{\circ}C} \cdot (1 + \varphi_{al} \cdot \psi_{al+60^{\circ}C})$$



$$= 11531,6 \cdot (1 + 0,41 \cdot 0,16)$$

$$= 12113,3 \text{ N}$$

$$F_{t \text{ cu} - 20^\circ \text{C}} = F_{st - 20^\circ \text{C}} \cdot (1 + \varphi_{al} \cdot \psi_{cu - 20^\circ \text{C}})$$

$$= 12126,4 \cdot (1 + 0,29 \cdot 0,25)$$

$$= 12229,4 \text{ N}$$

$$F_{t \text{ cu} + 60^\circ \text{C}} = F_{st + 60^\circ \text{C}} \cdot (1 + \varphi_{al} \cdot \psi_{cu + 60^\circ \text{C}})$$

$$= 11370,4 \cdot (1 + 0,29 \cdot 0,25)$$

$$= 11466,9 \text{ N}$$

Nilai maksimum gaya tarik hubung singkat  $F_t$  busbar pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling untuk masing-masing material aluminium dan tembaga terletak pada suhu operasional minimum  $-20^\circ \text{C}$  sebagai berikut.

$$F_{t \text{ al}} = 12298,3 \text{ N}$$

$$F_{t \text{ cu}} = 12229,4 \text{ N}$$

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

$$\delta_{m \text{ al}} = 25^\circ$$

$$\delta_{m \text{ cu}} = 14^\circ$$

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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling untuk masing-masing material aluminium dan tembaga sebagai berikut.

$$F_{t \text{ al tiang ujung}} = \frac{12298,3}{2} = 6149,15 \text{ N}$$

$$F_{t \text{ cu tiang ujung}} = \frac{12229,4}{2} = 6114,7 \text{ N}$$

Gaya mekanis pada tiang tengah dengan deviasi sudut lintasan  $0^\circ$  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

lantar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling harus mampu menahan gaya tarik hubung singkat  $F_t$  busbar berlawanan yang saling menghilangkan tersebut. Pada latar hubung 70 kV Gardu Induk Sengkaling tidak terdapat tiang sudut.

#### 4.6.5 Ayunan Maksimum Busbar saat Hubung Singkat

Perluasan busbar elastis  $\varepsilon_{ela}$  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.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ela\ al} - 20\text{ }^\circ\text{C} &= N_{al}((F_t - 20\text{ }^\circ\text{C}) - (F_{st} - 20\text{ }^\circ\text{C})) \\ &= 99,09 \cdot 10^{-9} \cdot (12298,3 - 12126,4) \\ &= 1,704 \cdot 10^{-5}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ela\ al} + 60\text{ }^\circ\text{C} &= N_{al}(F_t + 60\text{ }^\circ\text{C} - F_{st} + 60\text{ }^\circ\text{C}) \\ &= 100,81 \cdot 10^{-9} \cdot (11531,6 - 11370,4) \\ &= 1,597 \cdot 10^{-5}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ela\ cu} - 20\text{ }^\circ\text{C} &= N_{cu}(F_t - 20\text{ }^\circ\text{C} - F_{st} - 20\text{ }^\circ\text{C}) \\ &= 81,46 \cdot 10^{-9} \cdot (12229,4 - 12126,4) \\ &= 8,388 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ela\ cu} + 60\text{ }^\circ\text{C} &= N_{cu}(F_t - F_{st}) \\ &= 82,17 \cdot 10^{-9} \cdot (11466,9 - 11370,4) \\ &= 7,865 \cdot 10^{-6}\end{aligned}$$

Perbandingan  $T_{k11}$  dan  $\frac{T_{res}}{4}$  adalah  $T_{k11} \geq \frac{T_{res}}{4}$  maka perluasan busbar panas  $\varepsilon_{th}$  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.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{th\ al} - 20\text{ }^\circ\text{C} &= c_{th\ al} \cdot \left(\frac{I_{k3}}{A_{al}}\right)^2 \cdot \frac{T_{res\ al-20\text{ }^\circ\text{C}}}{4} \\ &= 0,27 \cdot \left(\frac{4916}{499,83}\right)^2 \cdot \frac{0,29}{4} \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}} \\ &= 7,5 \cdot 10^{-24} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{th\ al} + 60\text{ }^\circ\text{C} &= c_{th\ al} \cdot \left(\frac{I_{k3}}{A_{al}}\right)^2 \cdot \frac{T_{res\ al+60\text{ }^\circ\text{C}}}{4} \\ &= 0,27 \cdot \left(\frac{4916}{499,83}\right)^2 \cdot \frac{0,30}{4} \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}} \\ &= 7,7 \cdot 10^{-24} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{th cu}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C} &= c_{\text{th cu}} \cdot \left(\frac{I_{k3}}{A_{\text{cu}}}\right)^2 \cdot \frac{T_{\text{res cu}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}}{4} \\ &= 0,088 \cdot \left(\frac{4916}{400,14}\right)^2 \cdot \frac{0,39}{4} \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}} \\ &= 5,1 \cdot 10^{-24} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{th cu}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C} &= c_{\text{th cu}} \cdot \left(\frac{I_{k3}}{A_{\text{cu}}}\right)^2 \cdot \frac{T_{\text{res cu}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C}}{4} \\ &= 0,088 \cdot \left(\frac{4916}{400,14}\right)^2 \cdot \frac{0,40}{4} \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}} \\ &= 5,3 \cdot 10^{-24} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2\text{s}}\end{aligned}$$

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  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan maksimum  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  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  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan maksimum  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-32 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}C_{D\text{ al}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C} &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c\text{ al}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}}\right)^2 (\varepsilon_{\text{ela al}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C} + \varepsilon_{\text{th al}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{38}{0,41}\right)^2 (1,704 \cdot 10^{-5} + 7,5 \cdot 10^{-24})} = 1,86\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{D\text{ al}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C} &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c\text{ al}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C}}\right)^2 (\varepsilon_{\text{ela al}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C} + \varepsilon_{\text{th al}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{38}{0,44}\right)^2 (1,597 \cdot 10^{-5} + 7,7 \cdot 10^{-24})} = 1,80\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{D\text{ cu}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C} &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c\text{ cu}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}}\right)^2 (\varepsilon_{\text{ela cu}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C} + \varepsilon_{\text{th cu}} - 20\text{ }^{\circ}\text{C})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{38}{0,74}\right)^2 (8,388 \cdot 10^{-6} + 5,1 \cdot 10^{-24})} = 1,23\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{D\text{ cu}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C} &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c\text{ cu}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C}}\right)^2 (\varepsilon_{\text{ela cu}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C} + \varepsilon_{\text{th cu}} + 60\text{ }^{\circ}\text{C})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{38}{0,79}\right)^2 (7,865 \cdot 10^{-6} + 5,3 \cdot 10^{-24})} = 1,21\end{aligned}$$

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  $-20^\circ\text{C}$  dan maksimum  $+60^\circ\text{C}$  dihitung dengan Persamaan 2-30 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} b_{h\text{al}} - 20^\circ\text{C} &= (C_{F\text{al}} - 20^\circ\text{C}) \cdot (C_{D\text{al}} - 20^\circ\text{C}) \cdot (b_{c\text{al}} - 20^\circ\text{C}) \cdot \sin \delta_{1\text{al}} \\ &= 1,05 \cdot 1,86 \cdot 0,41 \cdot \sin 9,65^\circ \\ &= 0,13 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{h\text{al}} + 60^\circ\text{C} &= (C_{F\text{al}} + 60^\circ\text{C}) \cdot (C_{D\text{al}} + 60^\circ\text{C}) \cdot (b_{c\text{al}} - 20^\circ\text{C}) \cdot \sin \delta_{1\text{al}} \\ &= 1,05 \cdot 1,80 \cdot 0,44 \cdot \sin 9,65^\circ \\ &= 0,14 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{h\text{cu}} - 20^\circ\text{C} &= (C_{F\text{cu}} - 20^\circ\text{C}) \cdot (C_{D\text{cu}} - 20^\circ\text{C}) \cdot (b_{c\text{cu}} + 60^\circ\text{C}) \cdot \sin \delta_{1\text{cu}} \\ &= 1,05 \cdot 1,23 \cdot 0,74 \cdot \sin 5,14^\circ \\ &= 0,08 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{h\text{cu}} + 60^\circ\text{C} &= (C_{F\text{cu}} + 60^\circ\text{C}) \cdot (C_{D\text{cu}} + 60^\circ\text{C}) \cdot (b_{c\text{cu}} + 60^\circ\text{C}) \cdot \sin \delta_{1\text{cu}} \\ &= 1,05 \cdot 1,21 \cdot 0,79 \cdot \sin 5,14^\circ \\ &= 0,09 \text{ m} \end{aligned}$$

Nilai ayunan maksimum busbar di tengah rentang  $b_h$  saat hubung singkat pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling untuk masing-masing material aluminium dan tembaga terletak pada suhu operasional minimum  $+60^\circ\text{C}$  sebagai berikut.

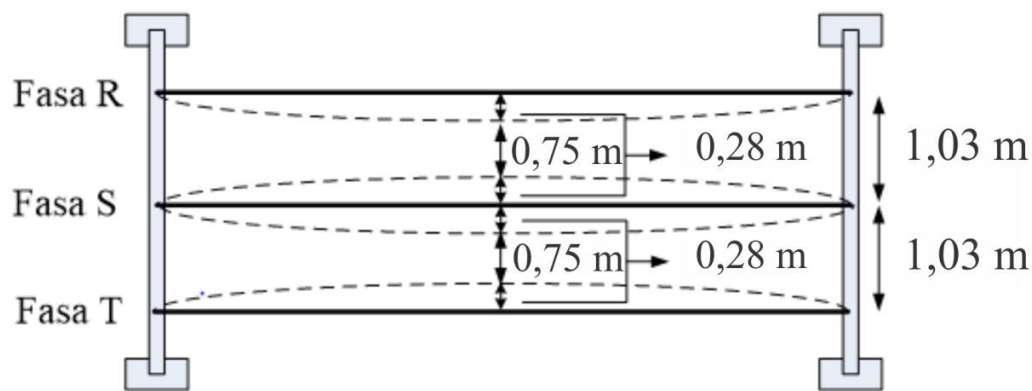
$$b_{h\text{al}} = 0,14 \text{ m}$$

$$b_{h\text{cu}} = 0,09 \text{ m}$$

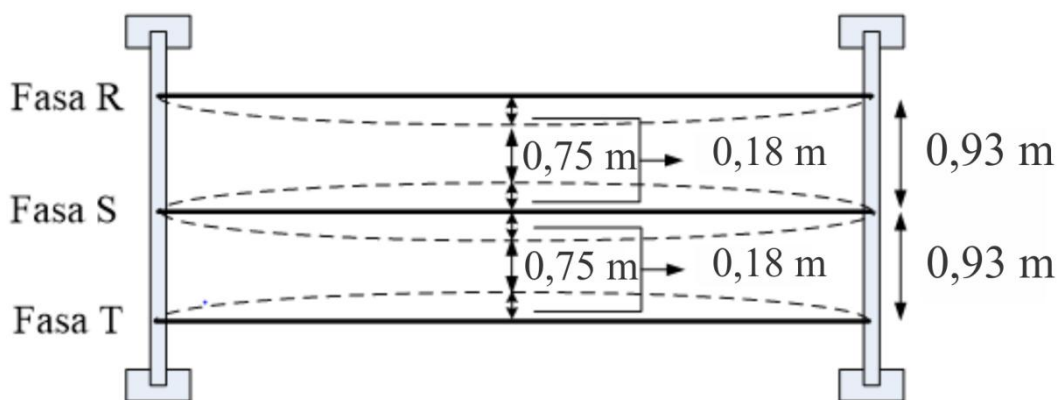
Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa busbar  $a_b$  untuk masing-masing material aluminium dan tembaga dengan mempertimbangkan ayunan maksimum busbar di tengah rentang  $b_h$  saat hubung singkat seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.11 dan 4.12 yang dihitung dengan Persamaan 2-36 berikut.

$$a_{b\text{al}} = a + (2 \cdot b_{h\text{al}}) = 0,75 + (2 \cdot 0,14) = 0,75 + 0,28 = 1,03 \text{ m}$$

$$a_{b\text{cu}} = a + (2 \cdot b_{h\text{cu}}) = 0,75 + (2 \cdot 0,09) = 0,75 + 0,18 = 0,93 \text{ m}$$



Gambar 4. 15 Jarak Aman Minimum Pemasangan Antar Fasa *Busbar* untuk Aluminium



Gambar 4. 16 Jarak Aman Minimum Pemasangan Antar Fasa *Busbar* untuk Tembaga

Rekapitulasi penghitungan keseluruhan *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling ditunjukkan dalam Lampiran 1.

#### 4.7. Penggambaran Tata Letak *Busbar* pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling

Gambar tata letak *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling 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 70 kV di Gardu Induk Sengkaling, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perencanaan *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling sebagai berikut:
  - a. *Busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling ditentukan menggunakan jenis material aluminium atau tembaga dan bentuk penampang kawat pilin.
  - b. Jenis konfigurasi *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling ditentukan menggunakan dua bus-satu pemutus daya dan dimensi *busbar* 61 kawat pilin dengan diameter 29,1 mm untuk aluminium dan 26 mm untuk tembaga.
2. Tata letak *busbar* pada latar hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling sebagai berikut:
  - a. Ketinggian minimum di dalam instalasi 3,19 m dan di luar instalasi 5,25 m.
  - b. Jarak aman antar peralatan di dalam instalasi 1,05 m dan di luar instalasi 2,25 m.
  - c. Jarak aman minimum jalan masuk pemeliharaan untuk manusia 1,9 m dan untuk transportasi 5,85 m.
  - d. Panjang *busbar* adalah 36,248 m.
  - e. Ketinggian minimum pemasangan *busbar* 4,23 m untuk aluminium dan 4,58 m untuk tembaga.
  - f. Gaya tarik *busbar* pada tiang ujung adalah 6149,15 N untuk aluminium dan 6114,7 N untuk tembaga.
1. Jarak aman minimum pemasangan fasa ke fasa *busbar* 1,03 m untuk aluminium dan 0,93 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, akan tetapi dilakukan perencanaan gardu induk secara menyeluruh.
3. Perencanaan untuk gardu induk dengan area terbatas dapat menggunakan *Gas Insulated Switchgear (GIS)*

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





## DAFTAR PUSTAKA

- ABB (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.
- 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.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

**LAMPIRAN**



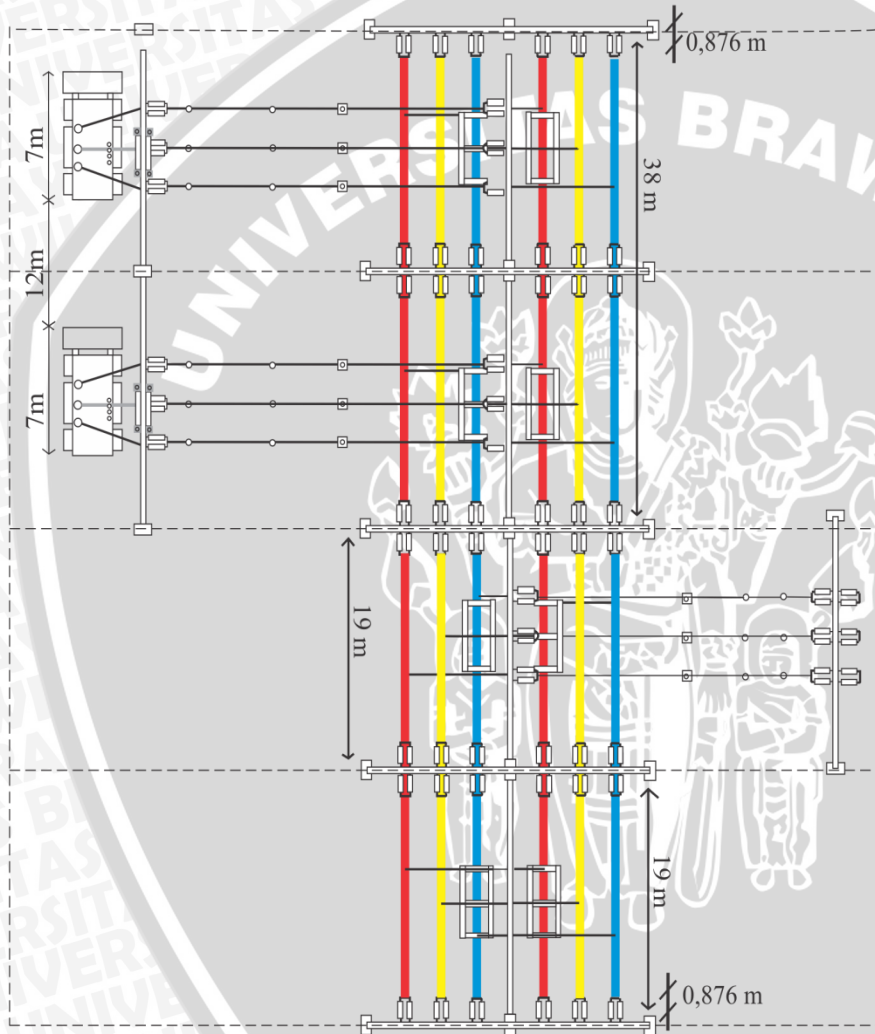
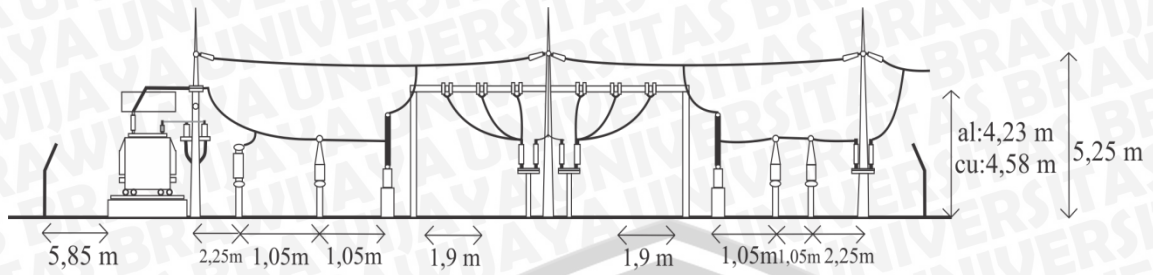
Lampiran 1 Rekapitulasi Penghitungan Perencanaan *Busbar* pada Latar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling

	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		61	61
Diameter pilin	mm	3,23	2,89
Diameter total	mm	29,1	26,0
Luas Penampang	mm <sup>2</sup>	499,83	400,14
Arus kontinu	A	960	960
kV <sub>dasar</sub>	kV	150	
MVA <sub>dasar</sub>	MVA	60	
$Z_1 T$	pu	j0,1263	
$Z_1$	pu	j0,04698	
$I_f$ 3 fasa	pu	- j21,286	
$I_{\text{dasar}}$	A	230,9401	
$I_f$ 3 fasa	A	4915,79 $\angle -90,0^\circ$	
$a$	mm	750	
$N$	mm	750	
$H$	mm	3190	
$H'$	mm	5250	
$O_2$	mm	1050	
$E$	mm	2250	
$M_a$	mm	1900	
$T$	mm	850	
$a_{T-T}$	m	12	
$l_s$	m	19	
$L$	m	38	
$l_i$	m	0,876	
$l_c$	m	36,248	
$a_k$	m	0,6	
$l_u$	m	38,025	

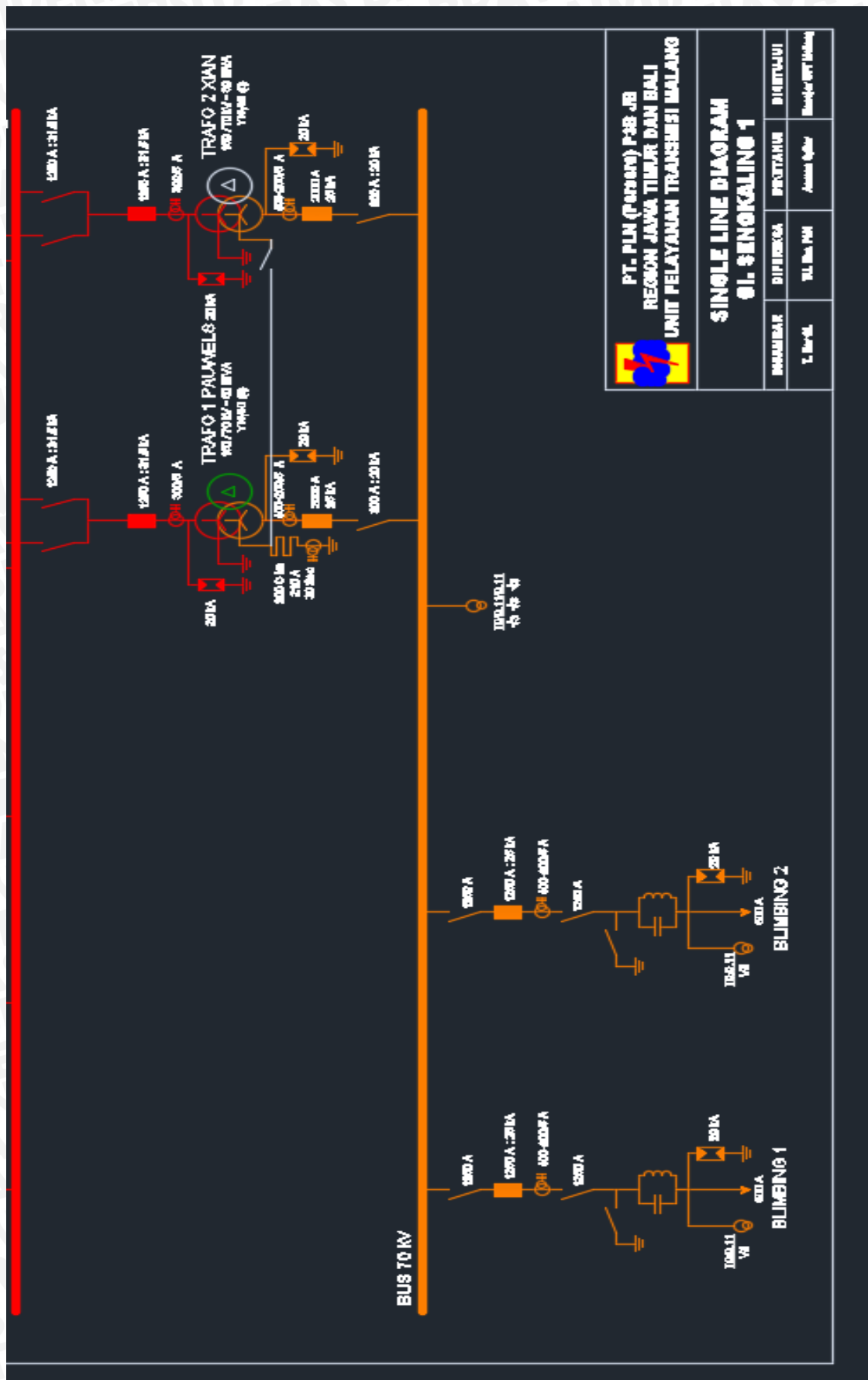
## Lanjutan Lampiran 1

	Satuan	Material			
		Aluminium		Tembaga	
		-20 °C	+60 °C	-20 °C	+60 °C
$m'$	kg/m	2,81		5,071	
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	0,41	0,44	0,74	0,79
$H_b$	m		4,23		4,58
$I_{k2}''^2$	(kA) <sup>2</sup>	18,125			
$F'$	N/m	4,61			
$r$		0,17		0,09	
$\delta_1$	°	9,65		5,14	
$T$	s	1,15	1,19	1,54	1,59
$T_{k11}$	s	0,46	0,47	0,62	0,64
$T_{res}$	s	1,14	1,18	1,54	1,59
$\Phi$		0,042		0,013	
$E$	kN/mm <sup>2</sup>	57		105	
$\sigma_{fin}$	N/mm <sup>2</sup>	50			
$E_s$	N/mm <sup>2</sup>	55000		100000	
$S$	N/mm	500			
$N$	N <sup>-1</sup>	$99,09 \cdot 10^{-9}$	$100,81 \cdot 10^{-9}$	$81,46 \cdot 10^{-9}$	$82,17 \cdot 10^{-9}$
$\zeta$		0,259	0,308	1,024	1,232
$\Psi$		0,34	0,39	0,66	0,70
$F_t$	N	12298,33	11531,61	12229,37	11466,95
$\delta_m$	°	25		14	
$F_f$	N	-	-	-	-
$F_t$ tiang ujung	N	6149,15		6114,7	
$\varepsilon_{ela}$		$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-6}$
$\varepsilon_{th}$	$\frac{m^4}{A^2s}$	$7,5 \cdot 10^{-24}$	$7,7 \cdot 10^{-24}$	$5,1 \cdot 10^{-24}$	$5,3 \cdot 10^{-22}$
$C_F$		1,05			
$C_D$		1,86	1,80	1,23	1,21
$b_h$	m	0,13	0,14	0,08	0,09
$a_h$	m	1,03		0,93	

Lampiran 2 Tata Letak Busbar Lantar Hubung 70 kV di Gardu Induk Sengkaling



al : 1,03 m  
cu : 0,93 m



PT PLN (PERSERO) P3B JB  
AREA PELAKSANA PEMELIHARAAN MALANG

LAPORAN BEBAN PUNCAK TRAFU DI GARDU INDUK  
BULAN : SEPTEMBER 2015

NO.	GARDU INDUK	TRAFO		ARUS NOM. (AMP)	OCR SETT.		BEBAN TERTINGGI				TEMPERATUR			BEBAN PERMAH DICAPAI			KET.				
		NO.	MERK		DAYA (MVA)	RATIO (KV)	A	KV	TGL	JAM	AMP	MW	MVAR	I Nom %	OIL	LV		HV	JUML KERJA OITC	TGL	JAM
1	KEBONAGUNG	I	FUJI	50	150/70	412	600	70	10	18.00	350	40,00	8,00	84,95	61	62	62	18	25-05-2015	18.00	355
2	KEBONAGUNG	II	MEIDENSHA	35	150/70	289	320	70	09	19.00	238	27,20	5,00	82,35	58	59	59	33	12-02-2015	19.00	245
3	KEBONAGUNG	III	UNINDO	100	150/70	824,8	1000	70	10	19.00	663	65,00	33,80	80,38	61	62	62	43	22-05-2015	18.00	675
4	KEBONAGUNG	IV	UNINDO	60	150/20	1.732	2000	20	23	19.00	544	12,10	3,80	31,41	-	55	-	411	03-08-2015	19.00	1420
5	KEBONAGUNG	V	TELK	30	150/20	866	1100	20	09	19.00	605	19,20	4,70	69,86	60	61	61	233	24-02-2015	19.00	640
6	KEBONAGUNG	VI	SHANDONG	60	150/20	1.732	2000	20	10	19.00	970	33,10	7,00	56,00	55	57	57	393	24-08-2015	19.00	965
7	TUREN	I	ALSTHOM	30	70/20	866	1000	20	07	19.00	700	21,00	2,50	80,83	46	-	-	326	10-06-2015	19.00	720
8	TUREN	II	ASEA	20	70/20	577	700	20	02	19.00	340	10,20	2,50	58,93	46	50	-	361	02-07-2015	19.00	570
9	TUREN	III	PAUWELS	30	70/20	866	1000	20	10	19.00	330	9,80	2,50	38,11	41	43	46	471	02-07-2015	19.00	570
10	KARANGKATES	I	UNINDO	30	70/20	866	1000	20	19	19.00	480	14,40	9,00	55,43	44	45	46	21715	27-06-2015	19.00	540
11	GAMPINGAN	I	UNINDO	20	70/20	165	129	70	-	-	-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-
12	SENGGURUH	I	XIAN	30	70/20	866	1000	20	09	19.00	640	20,50	5,40	73,90	59	69	85	17	15-01-2015	19.00	750
13	BLIMBING	I	UNINDO	20	70/20	577	700	20	28	18.00	340	12,20	5,00	58,93	50	50	50	115	20-04-2015	19.00	540
14	BLIMBING	II	PASTI	30	70/20	866	1000	20	28	18.00	420	14,00	5,00	48,50	56	58	60	242	19-01-2015	19.00	580
15	BLIMBING	III	UNINDO	30	70/20	866	1000	20	28	18.00	684	23,00	8,60	78,98	52	52	54	200	27-08-2015	19.00	567
16	POLEHAN	I	UNINDO	30	70/20	866	1000	20	02	19.00	330	11,20	4,20	38,11	50	52	-	14	01-05-2015	19.00	405
17	POLEHAN	II	TAKAOKA	20	70/20	577	800	20	26	19.00	320	10,20	3,40	55,46	47	-	-	7	09-01-2015	19.00	510
18	POLEHAN	III	UNINDO	30	70/20	866	1000	20	11	19.00	285	9,20	3,40	32,91	46	47	46	12	28-05-2015	19.00	460
19	SENGKALING	I	POUWELS	60	150/70	494	300	70	11	18.00	150	15,00	7,50	30,36	51	54	53	0	22-04-2015	18.00	200
20	SENGKALING	II	XIAN	30	150/70	247,4	300	70	10	18.00	91	10,10	4,50	36,78	47	48	48	0	14-05-2015	18.00	144
21	SENGKALING	III	UNINDO	30	150/20	866	1000	20	16	19.00	483	15,60	8,60	55,77	54	-	54	608	20-01-2015	19.00	650
22	SENGKALING	IV	TELK	60	150/20	1.734	2000	20	08	19.00	1.050	33,00	18,30	60,55	58	62	63	19	01-06-2015	19.00	1.100
23	LAWANG	I	SHANDONG	60	150/20	1.732	2000	20	01	19.00	740	23,70	6,50	42,73	59	58	61	5790	08-07-2015	19.00	820
24	LAWANG	II	ASEA	30	150/20	866	1000	20	30	10.00	420	12,80	4,80	48,50	59	57	61	25029	23-04-2015	10.00	405
25	PAKIS	I	TELK	30	150/20	866	1000	20	22	19.00	560	19,00	3,6	64,67	62	59	59	158	23-04-2015	10.00	750
26	PAKIS	II	POUWELS	60	150/20	1.726	2000	20	22	19.00	550	19,00	5	31,87	50	55	57	306	12-01-2015	19.00	600
27	PLTA. SELOREJO	I	TAKAOKA	20	70/20	577	800	20	09	19.00	106	3,20	0,40	18,37	43	-	-	128	11-02-2015	19.00	105



