

repository.ub.ac.id

**RANCANG BANGUN *BUSBAR* TERISOLASI
GAS SF₆ PADA GARDU INDUK SENGKALING
150 kV**

SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:
Indri Rahmawati
NIM. 115060301111038- 63

KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
MALANG
2015

LEMBAR PERSETUJUAN

RANCANG BANGUN *BUSBAR* TERISOLASI GAS SF₆ PADA
GARDU INDUK SENKALING 150 kV

SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

Indri Rahmawati

NIM. 115060301111038 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs., Ir. Moch. Dhofir, MT.

NIP. 19600701 199002 1 001

Ir. Soemarwanto, MT.

NIP. 19500715 198003 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN *BUSBAR* TERISOLASI GAS SF₆ PADA
GARDU INDUK SENGKALING 150 kV

SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:
Indri Rahmawati
NIM. 115060301111038 – 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 4 Juni 2015

DOSEN PENGUJI

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.
NIP. 19630106 198802 1 001

Ir. Soeprapto, M.T.
NIP. 19561020 198903 1 001

Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.
NIP. 19680122 199512 2 001

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D
NIP. 19741203 200012 1 001



Dan langit telah ditinggikan – Nya dan Dia ciptakan keseimbangan

Agar kamu jangan merusak keseimbangan itu

Dan tegakkanlah keseimbangan itu dengan adil dan janganlah kamu

mengurangi keseimbangan itu

Dan bumi telah dibentangkannya untuk makhluk

-Nya

Maka nikmat Tuhan manakah yang kamu dustakan?

PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena hanya dengan rahmat, ridho, dan kasih sayang-Nya skripsi yang berjudul "Rancang Bangun *Busbar* Terisolasi Gas SF₆ Pada Gardu Induk Sengkaling 150 kV", dapat diselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Banyak kendala yang dihadapi dalam penyelesaian skripsi ini, namun kendala tersebut dapat diatasi berkat bantuan secara langsung maupun tidak langsung dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini ucapan terimakasih ingin disampaikan kepada pihak – pihak yang telah memberikan bantuan, berbagai pihak tersebut diantaranya yaitu:

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku KKDK Teknik Energi Elektrik dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
3. Bapak Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT. Dan Bapak Ir. Soemarwanto, MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dengan penuh kesabaran dan memberi pengarahan dalam penyelesaian penelitian ini.
4. Kedua orang tua tercinta, Bapak Sutomo, Ibu Sri Fatmawati, Mas Irwan, Neng Irin, Mas Isman yang senantiasa mendoakan, memberikan nasihat, kasih sayang, dan perhatian selama ini.
5. Dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang selama ini telah membantu segala urusan penyelesaian skripsi.
6. Seluruh teman-teman Konsentrasi Teknik Energi Elektrik yang menjadi teman diskusi dalam pengerjaan skripsi ini.

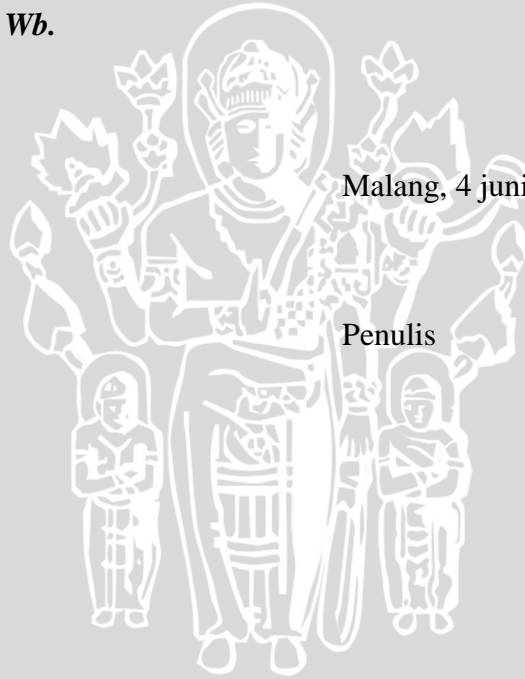
7. Seluruh teman-teman angkatan 2011 Inverter dan teman – teman Al-Hadiid yang telah mendukung selama proses pengerjaan skripsi.
8. Seluruh keluarga besar asisten Laboratorium Elektronika Daya Universitas Brawijaya Malang.
9. Pihak - pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Disadari skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik mengenai skripsi ini diharapkan dan dibutuhkan. Saran dan kritik ditujukan agar skripsi ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan lebih berguna. Akhir kata, semoga laporan penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan berkah.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Malang, 4 juni 2015

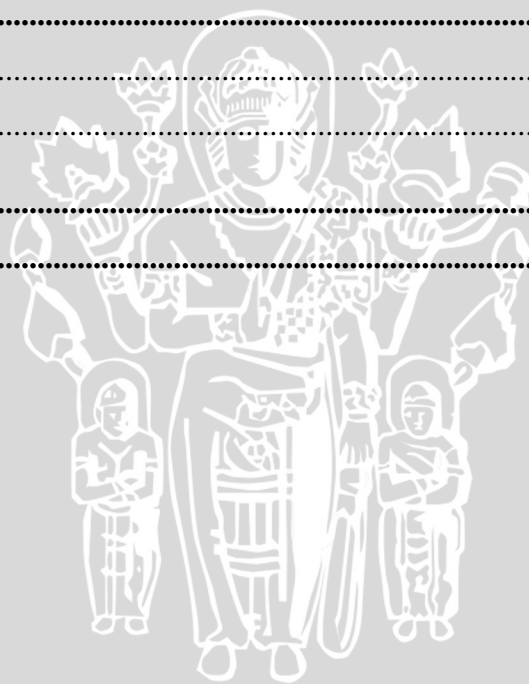
Penulis



DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
TABEL LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
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 Manfaat	3
1.6 Sistematika Pembahasan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Pengertian <i>Busbar</i>	4
2.2 Pentingnya <i>Busbar</i>	4
2.3 <i>Busbar</i> Terisolasi Gas SF ₆	4
2.4 Konstruksi <i>Busbar</i> Terisolasi Gas SF ₆	6
2.5 <i>Coating</i>	18
2.6 Isolasi Udara.....	19
2.6.1 Isolasi gas SF ₆	20
2.6.2 Tekanan Gas	23
2.6.3 Kerapatan gas SF ₆	25
2.7 Sifat Kimia gas SF ₆	25
2.8 Kemampuan Memindah Panas.....	26
2.9 Enthalpi	26
2.10 Mekanisme <i>Breakdown</i> Gas SF ₆ pada Medan Seragam dan Medan yang Tidak Seragam	26
2.11 Medan Dalam Silinder Konsentris	30
2.12 Penentuan Dimensi Kabel Koaksial.....	32
2.13 Minimilasi Volume Isolasi	34
BAB III METODE PENELITIAN	36
3.1 Pengambilan Data	36

3.2	Perhitungan dan Analisis Penampang <i>Busbar</i>	37
3.3	Penentuan Dimensi Konduktor dan Penutup	37
3.3.1	Penentuan Dimensi Konduktor.....	37
3.3.2	Penentuan Dimensi Penutup Konduktor	38
3.4	Kesimpulan dan Saran.....	39
BAB IV PEMBAHASAN		40
4.1	Analisis Jari – Jari dan Material <i>Busbar</i>	40
4.2	Metode Analisis Jari – Jari Menggunakan KHA	41
4.3	Metode Penentuan Jari – Jari <i>Busbar</i> Menggunakan Arus Hubung Singkat ...	43
4.4	Penentuan Dimensi <i>Busbar</i> Menggunakan Ketahanan Tegangan Tembus	51
4.5	Analisis Tekanan <i>Busbar</i>	60
4.6	Analisis Dimensi Penutup <i>Busbar</i>	67
BAB V PENUTUP		70
5.1	Kesimpulan	70
5.2	Saran.....	72
DAFTAR PUSTAKA		73
LAMPIRAN.....		75



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Penyulang pada GIS (<i>Gas Insulated Switchgear</i>).....	5
Gambar 2.2	Kenaikan temperatur pada beberapa titik pada GIS.....	8
Gambar 2.3	<i>Busbar</i> tiga fasa pada satu tabung dengan arus penutup.....	17
Gambar 2.4	<i>Busbar</i> satu fasa pada satu tabung dengan arus penutup	18
Gambar 2.5	Struktur molekul gas SF ₆	21
Gambar 2.6	Hubungan antara tekanan, suhu dan kerapatan dari gas SF ₆	24
Gambar 2.7	Hubungan tekanan terhadap kerapatan gas SF ₆	25
Gambar 2.8	Pengaruh medan muatan ruang (<i>E_a</i>) terhadap longsor saat penguatan kritis diterapkan pada medan seragam (<i>E₀</i>).....	29
Gambar 2.9	Penampang silinder koaksial.....	30
Gambar 3.1	Diagram alir pelaksanaan penelitian.....	36
Gambar 3.2	Diagram alir perhitungan dimensi konduktor <i>busbar</i>	38
Gambar 3.3	Diagram alir perhitungan dimensi penutup.....	39
Gambar 4.1	Single line diagram gardu induk Sengkaling.....	40
Gambar 4.2	Hubungan antara <i>r₂</i> terhadap <i>V_d</i> dengan membuat <i>r₁</i> bernilai konstan	57
Gambar 4.3	Hubungan antara <i>r₁</i> terhadap <i>V_d</i> dengan membuat <i>r₂</i> bernilai konstan	57
Gambar 4.4	Gambar penampang <i>busbar</i> yang terisolasi gas SF ₆ 150 kV	59
Gambar 4.5	Hubungan antara tekanan gas SF ₆ dan kekuatan medan dielektrik	62
Gambar 4.6	Hubungan antara perubahan dimensi terhadap tekanan gas SF ₆	66

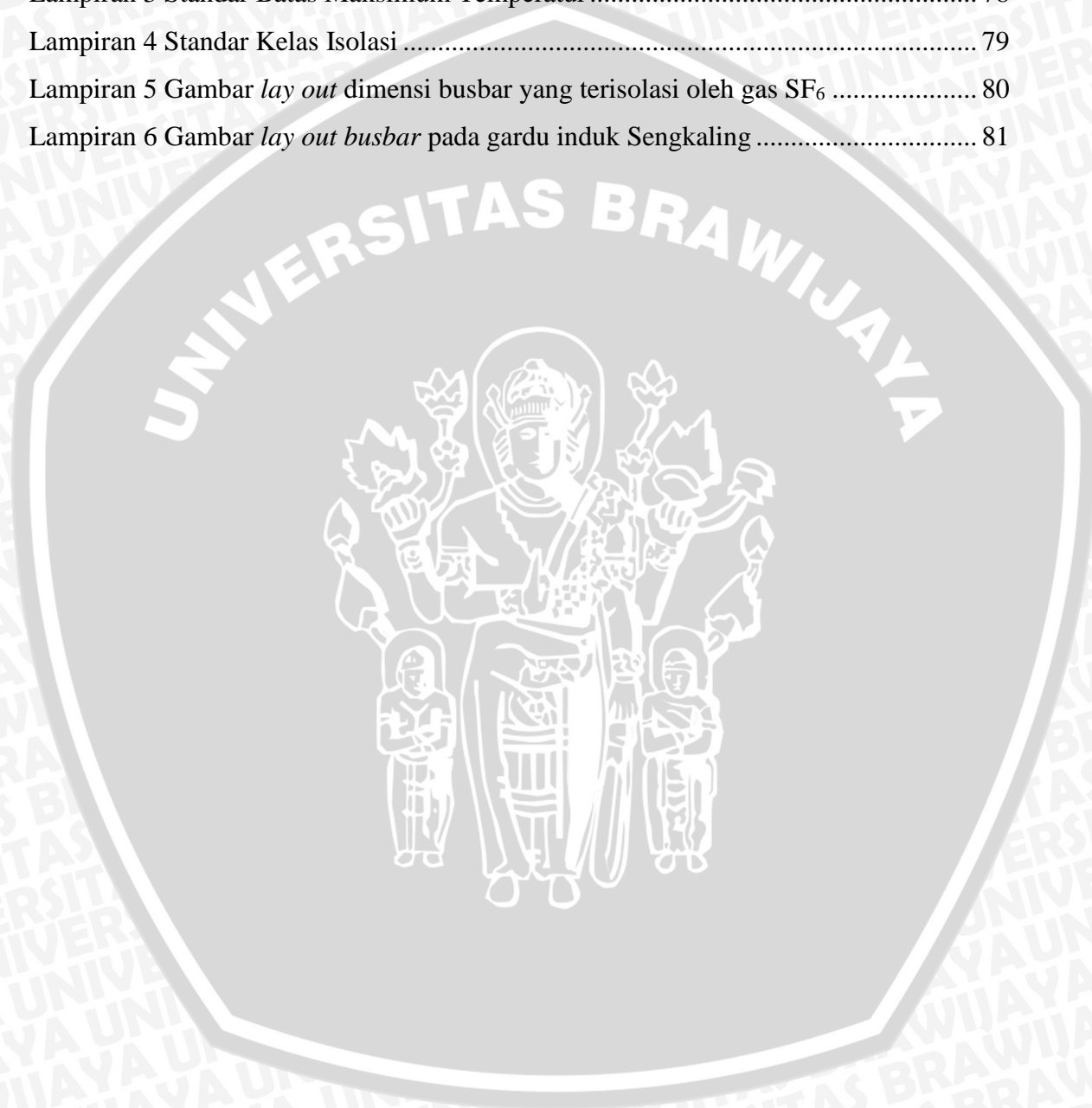
DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Hubungan antara nilai tegangan sistem dan arus hubung singkat	8
Tabel 2.2	Standar temperatur maksimal dan kenaikan temperatur	9
Tabel 2.3	Kelas temperatur isoalsi dan kenaikan temperatur pada beberapa bagian, material, dan dielektrik pada <i>switchgear</i> tegangan tinggi	11
Tabel 2.4	Luas penampang dan kuat hantar arus konduktor tabular tembaga.....	12
Tabel 2.5	Luas penampang dan kuat hantar arus konduktor tabular aluminium.....	13
Tabel 2.6	Hubungan antara tingkat tegangan dan dimensi <i>busbar</i>	15
Tabel 2.7	Karakteristik material tembaga dan aluminium.....	16
Tabel 2.8	Karakteristik fisika dari gas SF ₆	21
Tabel 2.9	Berbagai jenis gas dan karakteristiknya	22
Tabel 4.1	Kapasitas transformator penyuplai <i>busbar</i> Sengkaling	41
Tabel 4.2	Arus dan luas penampang konduktor tabular terpilih berdasarkan KHA.....	43
Tabel 4.3	Pengaruh luas penampang terhadap kenaikan temperatur pada konduktor..	47
Tabel 4.4	Luas penampang dan temperatur saat terjadi kegagalan pada konduktor tabular tembaga.....	48
Tabel 4.5	Luas penampang dan temperatur saat terjadi kegagalan pada konduktor tabular aluminium.....	49
Tabel 4.6	Dimensi konduktor tabular berdasarkan standar temperatur	50
Tabel 4.7	Dimensi konduktor tabular berdasarkan tegangan <i>breakdown</i>	52
Tabel 4.8	Dimensi <i>busbar</i> yang diperoleh dari ketahanan <i>breakdown</i> dan standar temperatur	54
Tabel 4.9	Hubungan antara dimensi dan tegangan tembus yang terjadi	58
Tabel 4.10	Hubungan antara Diameter konduktor bagian dalam terhadap dimensi <i>busbar</i> yang terisolasi oleh gas SF ₆	59
Tabel 4.11	Tekanan medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan berbeda	61
Tabel 4.12	Tekanan gas SF ₆ yang dihasilkan dari kuat medan maksimal.....	64
Tabel 4.13	Faktor keamanan disain <i>busbar</i> yang dihasilkan dari perbandingan berbagai tekanan medan	65
Tabel 4.14	Hubungan antara perubahan dimensi <i>busbar</i> terhadap tekanan gas SF ₆	65



TABEL LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Gambar Single Line Diagram Gardu Induk Sengkaling	76
Lampiran 2	Standar Rating Tegangan ANSI/IEEE C37.38-1989	77
Lampiran 3	Standar Batas Maksimum Temperatur	78
Lampiran 4	Standar Kelas Isolasi	79
Lampiran 5	Gambar <i>lay out</i> dimensi busbar yang terisolasi oleh gas SF ₆	80
Lampiran 6	Gambar <i>lay out busbar</i> pada gardu induk Sengkaling	81



RINGKASAN

Indri Rahmawati, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2015, **Rancang Bangun Busbar Terisolasi Gas SF₆ pada Gardu Induk Sengkaling 150 kV**. Dosen Pembimbing: Moch. Dhofir, dan Soemarwanto.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat rancang bangun busbar 150 kV dengan isolasi gas SF₆ di gardu induk Sengkaling. Manfaat dari penelitian ini agar perancangan busbar 150 kV dengan isolasi gas SF₆ dapat dijadikan rujukan untuk pemilihan perencanaan pengembangan gardu induk di Sengkaling yang berada dalam kondisi lahan yang terbatas. Pada penelitian ini dirumuskan bagaimana perancangan busbar yang terisolasi oleh gas SF₆ dan pengaruh adanya gas SF₆ terhadap dimensi busbar. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini berkaitan dengan pengaruh kekuatan medan dielektrik gas SF₆ sebesar 89 kV/cm terhadap perancangan dimensi busbar 150 kV. Perancangan busbar yang diutamakan adalah ketahanan busbar yang diisolasi oleh gas SF₆ dalam menahan arus hubung singkat sebesar 40 kA dan kekuatan busbar tersebut dalam menahan tegangan ketahanan frekuensi jala – jala 50 Hz sebesar 341 kV. Dimensi yang dihasilkan adalah sebuah batangan konduktor tabular yang terbuat dari bahan tembaga dan aluminium. Dimensi konduktor busbar 150 kV yang terbuat dari bahan tembaga memiliki luas penampang 726 (mm²), diameter konduktor 80 (mm), ketebalan konduktor 3 (mm) dan dimensi konduktor busbar 150 kV yang terbuat dari bahan aluminium memiliki luas penampang 1180 (mm²), diameter konduktor 80 (mm), ketebalan konduktor 5 (mm). Sedangkan jarak antara konduktor busbar dan penutup yang terbuat dari material tembaga dan aluminium memiliki nilai yang sama yaitu sebesar 687 (mm). Ketahanan busbar tersebut selain mempengaruhi dimensi busbar juga mempengaruhi tekanan gas yang berada didalam tabung penutup busbar yang dapat ditentukan berdasarkan kuat medan dielektrik gas SF₆. Keberadaan gas SF₆ mampu merubah dimensi busbar menjadi kecil dan memiliki kekuatan untuk menahan tegangan tembus yang besar, nilai tekanan gas yang dihasilkan adalah sebesar 3,2 bar. Tekanan gas SF₆ juga mempengaruhi dimensi ketebalan penutup minimal, hasil yang didapatkan dari proses perhitungan dan analisis ketebalan penutup adalah 6,67 mm untuk material tembaga dan 7,62 mm untuk material aluminium.

Kata kunci : Busbar, Gas SF₆, Isolasi, Medan Listrik.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan listrik di Indonesia secara tidak langsung berdampak pada peningkatan penyuplai energi listrik yang mampu untuk mencukupi konsumsi energi tersebut. Proses penambahan penyuplai energi listrik akan membutuhkan pembangkit listrik atau gardu induk yang baru.

Gardu induk terdiri dari dua jenis yaitu gardu induk gas dan gardu induk konvensional. Gardu induk gas disebut juga GIS (*Gas Insulated Switchgear*), gardu gas tersebut menggunakan dielektrik yang handal yaitu gas SF₆ sebagai media isolasinya. Konduktor tegangan tinggi, pemutus sirkuit, sakelar, transformer arus, dan transformator tegangan dilindungi dengan gas SF₆ didalam tabung logam yang ditanahkan. Sedangkan gardu konvensional yang biasanya disebut AIS (*Air Insulated Substation*) menggunakan atmosfer udara sebagai media isolasinya.

Isolasi atmosfer udara yang digunakan pada gardu konvensional atau AIS (*Air Insulated Substations*) memiliki kekuatan dielektrik yang lebih kecil dibandingkan dengan gas SF₆, sehingga AIS (*Air Insulated Substations*) membutuhkan jarak pemisah antar konduktor bertegangan yang lebih besar jika dibandingkan dengan isolasi menggunakan gas SF₆ di dalam GIS (*Gas Insulated Switchgear*). Sehingga GIS (*Gas Insulated Switchgear*) membutuhkan area yang lebih kecil dari AIS (*Air Insulated Substations*) sampai sepuluh kali lipatnya. GIS (*Gas Insulated Switchgear*) banyak digunakan di mana ruang mahal atau tidak tersedia.

Didalam gardu induk terdapat *busbar* yang merupakan perangkat yang penting untuk diperhatikan dalam sistem pembangkitan dan penyaluran energi listrik, karena *busbar* adalah titik pertemuan atau titik penghubung trafo - trafo tenaga, SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi), dan peralatan listrik lainnya yang berfungsi untuk menerima dan menyalurkan energi listrik dalam kapasitas yang besar. Keberadaan *busbar* tersebut akan membutuhkan area yang luas apabila menggunakan isolasi atmosfer udara. Proses perluasan area sangat sulit dilakukan pada daerah dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi, dan perluasan area tersebut akan menyebabkan terjadinya permasalahan baru yaitu pembebasan lahan warga yang saat ini sulit sekali dilaksanakan.

Oleh karena itu ada kecenderungan perancangan gardu induk yang lebih kompak dan tidak membutuhkan area yang luas, terutama pada perancangan *busbar*. Hal tersebut dapat diwujudkan dengan memperkecil jarak antar *busbar* atau memperkecil dimensi *busbar* dengan cara meningkatkan isolasi pada *busbar*. Adanya isolasi bertujuan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar tidak terjadi lompatan listrik yang mengakibatkan *breakdown*.

Gas SF₆ yang digunakan sebagai bahan isolasi dapat memisahkan antara bagian yang bertegangan dengan *ground* dengan jarak yang sangat pendek. Selain itu jika terjadi percikan api atau busur api pada peralatan yang diisolasi gas SF₆, maka gas tersebut akan berfungsi sebagai peredam busur api, sehingga tidak terjadi kerusakan yang parah pada peralatan tersebut, tidak terpengaruh cuaca yang terjadi, dan tidak perlu merisaukan adanya benda yang tersangkut pada *busbar* yang menyebabkan kegagalan. Dikarenakan hal tersebut maka perlu adanya studi mengenai pengaruh adanya gas SF₆ terhadap perancangan dimensi *busbar*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan *busbar*
2. 150 kV dengan isolasi gas SF₆ pada gardu induk Sengkaling.
3. Berapa dimensi *busbar* 150 kV dengan menggunakan isolasi gas SF₆

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas di dalam penelitian ini tidak meluas maka ditentukan batasan masalah sebagai berikut:

1. Perancangan *busbar* 150 kV dengan isolasi gas SF₆ menggunakan data sekunder *busbar* konvensional yang bertegangan 150 kV di gardu induk Sengkaling.
2. Menggunakan konfigurasi *busbar* berbentuk *gas insulated single phase encapsulated for double busbar systems*.
3. Tidak membahas gardu induk secara menyeluruh.
4. Tidak membahas tinjauan ekonomis perancangan *busbar*.
5. Tidak menghitung dimensi isolator penyangga dan isolator pelindung.

6. Tidak merancang dimensi *busbar* pada titik penghubung *busbar* dengan peralatan yang lain.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat rancang bangun *busbar* 150 kV dengan isolasi gas SF₆ di gardu induk Sengkaling.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah agar dapat dijadikan rujukan untuk pemilihan perencanaan pengembangan gardu induk yang berada dalam kondisi lahan yang terbatas.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- BAB I** : Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan.
- BAB II** : Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.
- BAB III** : Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam skripsi ini, meliputi metode pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data.
- BAB IV** : Berisi pembahasan, analisis terhadap masalah yang diajukan dalam skripsi dengan memperhatikan hasil analisis.
- BAB V** : Berisi penutup yang terdiri dari kesimpulan dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Busbar

Busbar merupakan batangan konduktor yang sering dijumpai pada sebuah peralatan panel distribusi baik untuk distribusi tegangan rendah sampai tegangan tinggi. *Busbar* merupakan titik hubungan pertemuan antara transformator daya, SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) dengan komponen listrik lainnya, untuk menerima dan menyalurkan energi listrik. *Bus* di dalam *substation* adalah jaringan konduktor yang menghubungkan kawat transmisi, transformator, *circuit breaker*, *disconnecting switch*, dan peralatan yang lainnya (Leon Kempner, 2005: 8).

2.2 Pentingnya Busbar

Busbar adalah komponen yang paling penting dalam sistem transmisi dan distribusi energi listrik karena merupakan titik dimana rangkaian peralatan pembangkit listrik berkumpul untuk mengirimkan atau menerima daya elektrik. *Busbar* tersebut dapat menjadi *busbar* terbuka jika *busbar* tersebut diletakkan di luar ruangan pada *switchyard* dengan isolasi udara, *busbar* tersebut mampu menahan tegangan hingga ribuan kilo volt.

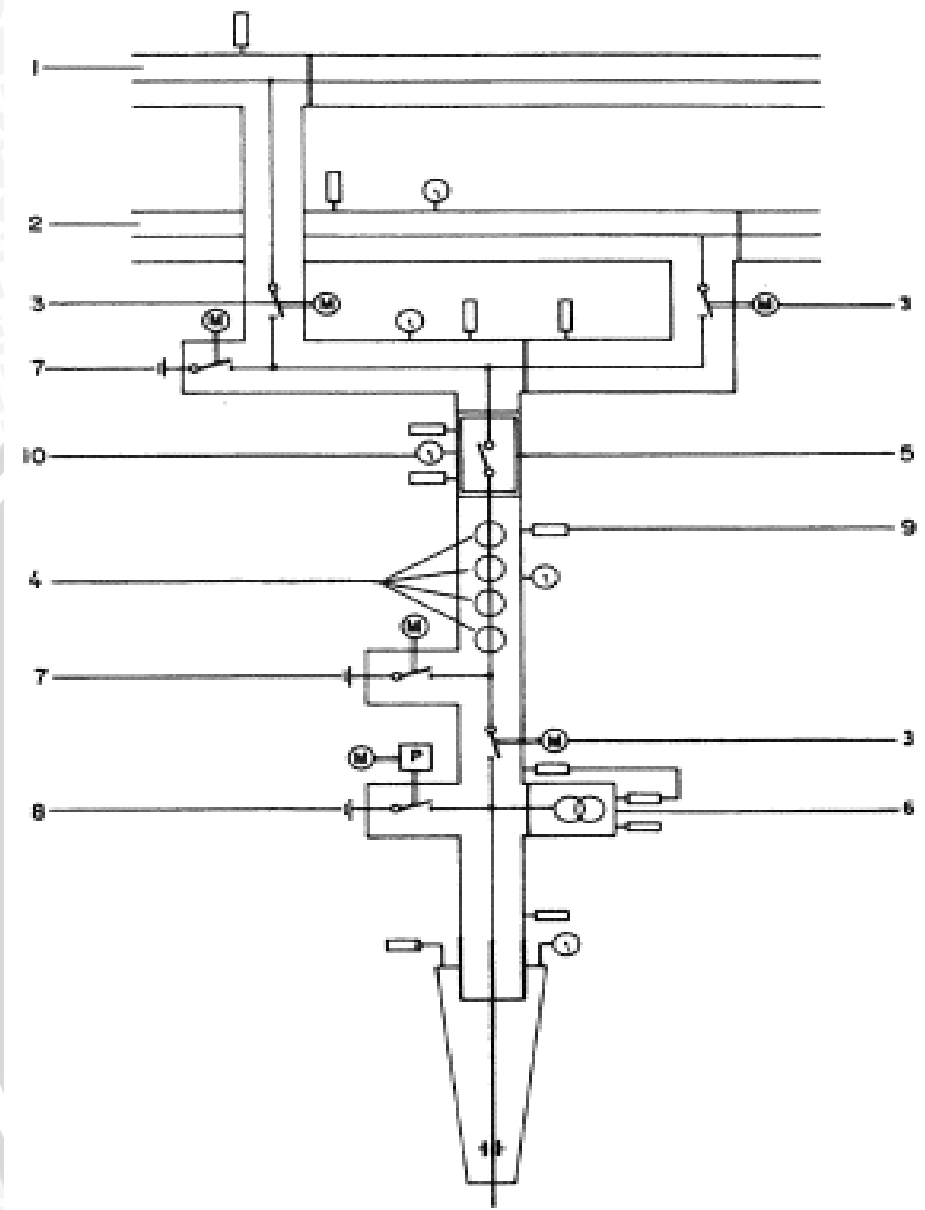
2.3 Busbar Terisolasi Gas SF₆

Busbar yang diisolasi oleh gas merupakan *busbar* yang diselubungi oleh penutup metal dengan gas sebagai pemisah antara konduktor yang bertegangan dengan penutup yang ditanahkan. Gas yang digunakan untuk mengisolasi *busbar* adalah gas SF₆.

Busbar yang terisolasi gas SF₆ memiliki keuntungan pada hubungan antar kawat yaitu mempunyai kapasitas transmisi yang lebih besar dengan kerugian lebih kecil, daya pembebanan rendah, dan bebas penuaan seperti yang terjadi pada isolasi minyak, serta menyebabkan rugi – rugi resistif rendah, sehingga pendinginan ekstra umumnya tidak dibutuhkan.

Gas SF₆ biasanya digunakan untuk mengisolasi peralatan pada GIS (*Gas Insulated Switchgear*), sedangkan pada AIS (*Air Insulated Substation*) menggunakan udara sebagai media isolasi. Isolasi dengan menggunakan atmosfer udara membutuhkan jarak yang bermeter – meter sedangkan pada isolasi yang menggunakan gas SF₆ dapat diatasi

dalam jarak yang berukuran sentimeter (Jhon D. McDonald, 2007: 2). Pada Gambar 2.1 ditunjukkan Gambar penyulang pada gardu induk gas.



Gambar 2.1 Penyulang pada GIS (*Gas Insulated Switchgear*)

Sumber: Mazen Abdel Salam, 2000: 295

Keterangan Gambar 2.1:

- | | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 1 : busbar i. | 6 : voltage transformer. |
| 2 : busbar ii. | 7 : maintenance grounding switch. |
| 3 : disconnector. | 8 : high-speed grounding switch. |
| 4 : current transformer. | 9 : gas connector. |
| 5 : circuit breaker. | 10 : density monitor. |

Dari Gambar 2.1 menunjukkan bahwa busbar dihubungkan dengan berbagai perangkat lain sehingga untuk alasan apapun jika terjadi gangguan pada busbar yang menyebabkan busbar gagal beroperasi akan mengakibatkan pemadaman semua beban distribusi yang terhubung pada busbar tersebut.

2.4 Konstruksi Busbar Terisolasi Gas SF₆

Fasa busbar yang terisolasi (*isolated-phase bus*) adalah salah satu fasa dari konduktor yang ditutup oleh rumah metal, dimana konduktor dan penutup metal dipisahkan oleh udara, busbar dapat melakukan pendinginan sendiri atau juga bisa didinginkan dengan sirkulasi gas atau cairan (ANSI/IEEE C37.23-1987).

Gas yang digunakan sebagai media untuk memisahkan antara konduktor dan penutup adalah gas SF₆. Busbar yang terisolasi gas SF₆ terdiri atas tiga komponen yaitu:

1. Konduktor busbar.
2. Penutup (*enclosuer*).
3. Gas SF₆.

Konduktor pada busbar yang terisolasi oleh gas SF₆ merupakan batangan metal yang berbentuk silinder cincin (*tabular*), konduktor tersebut berfungsi sebagai media penghantar arus. Menurut PUIL 2000 penghantar sirkit akhir yang menyuplai motor tunggal tidak boleh mempunyai KHA kurang dari 125 % arus pengenal beban penuh. Sehingga nilai arus konduktor adalah:

$$I_d = 125\% \times I_n \quad (2-1)$$

Dengan:

I_d : Arus disain penghantar

I_n : Arus nominal beban penuh

Sedangkan besarnya nilai arus nominal beban penuh tiga fasa didapatkan dari persamaan daya yang ditunjukkan pada persamaan 2-2: (William D Stevenson, 1982:34)

$$S = \sqrt{3} V_l I_l \quad (2-2)$$

Dengan $I_l = I_n$, maka:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} V_l} \quad (2-3)$$

Dimana:

S : Daya transformator

V_l : Tegangan *line* (RMS)

Selain didasarkan pada kuat hantar arus pada konduktor, penentuan dimensi konduktor *busbar* juga didasarkan pada kenaikan temperatur konduktor saat terjadi arus hubung singkat. Penentuan luas penampang tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus: (K.C Agrawal, 2001: 856)

$$\theta_t = \frac{K}{100} \times \left(\frac{I_{sc}}{A}\right)^2 \times (1 + \alpha_{20^{\circ}C} \cdot \theta) \times t \quad (2-4)$$

Keterangan:

I_{sc} : Arus gangguan hubung singkat (A).

A : luas penampang (mm²).

K : Konstanta sebesar 1.166 untuk aluminium dan 0.52 untuk tembaga.

θ : Suhu saat terjadi kegagalan (°C).

θ_t : Kenaikan suhu (°C).

$\alpha_{20^{\circ}C}$: 0.00403 untuk aluminium murni, 0.00393 untuk tembaga.

t : Waktu terjadinya gangguan (s).

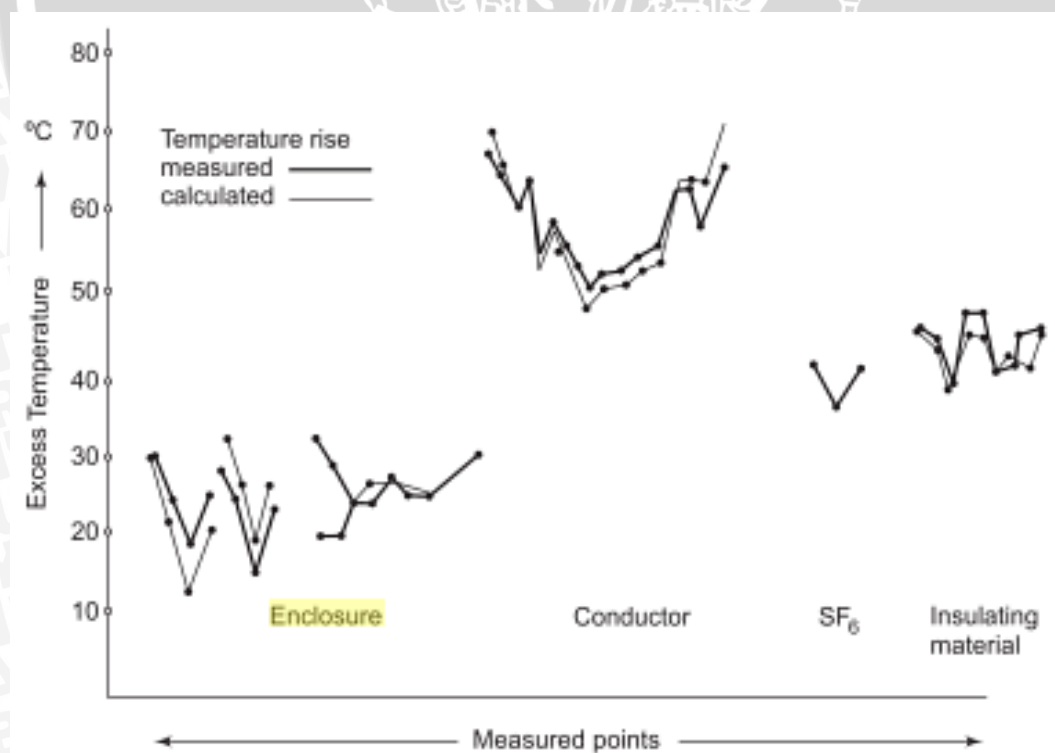
Persamaan 2-4 menunjukkan bahwa kenaikan temperatur pada konduktor berbanding terbalik dengan kuadrat dari luas penampang konduktor. Jadi apabila luas penampang konduktor semakin kecil maka kenaikan suhu akan semakin besar. Persamaan 2-4 juga dipengaruhi oleh arus hubung singkat yang terjadi. Tingkatan besarnya arus hubung singkat ditunjukkan oleh Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hubungan antara nilai tegangan sistem dan arus hubung singkat

Arus hubung singkat (kA)						
63-100				X	X	X
50-63			X	X	X	X
31.5-50		X	X	X		
25-31.5		X	X			
16-25	X					
Tingkat tegangan (kV)	52-72.5	100-170	245-300	362-550	800	1100

Sumber: Herman J Kock, 2014:16

Tabel 2.1 menunjukkan bahwa besarnya nilai arus hubung singkat yang terjadi dipengaruhi oleh besarnya nilai tegangan pada sistem. Hubungan antara tegangan dan arus hubung singkat adalah berbanding lurus, jadi apabila tegangan pada sistem memiliki nilai yang tinggi maka arus hubung singkat juga tinggi. Sedangkan suhu yang diizinkan dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kenaikan temperatur pada beberapa titik pada GIS.

Sumber: M.S Nidu, 2008: 65

Gamabr 2.2 menunjukkan bahwa suhu maksimal yang diizinkan pada penutup adalah 30 °C, suhu maksimal pada konduktor adalah 65 – 70 °C, suhu maksimal pada gas SF₆ adalah 40 °C, dan pada material isolasi sekitar 45 °C. Dan waktu terjadinya gangguan adalah 1 detik samapai 3 detik (K.C Agrawal, 2001:864). Sedangkan menurut IEEE kenaikan temperatur maksimal yang diizinkan pada metal ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Standar temperatur maksimal dan kenaikan temperatur

sifat dasar bagian, material, dan dielektrik (lihat catatan dibawahnya)		Nilai Maksimal		
		Temperatur (°C)	kenaikan temperatur pada temperatur lingkungan yang tidak melebihi 40 °C (K)	
1	<i>Contacts</i> (lihat poin 4 dan 14)			
	Tembaga telanjang atau tembaga telanjang campuran — Di udara	75	35	
		70	30	
	— Di SF ₆ (lihat poin 5)	105	65	
		90	50	
<i>Tin-coated</i> (lihat poin 6) — Di SF ₆ (lihat poin 5)	90 105	50 65		
2	<i>Connection, bolted, atau the equivalent</i> (lihat poin 4) Tembaga telanjang, tembaga telanjang campuran, atau aluminium telanjang Campuran — Di udara	90	50	
		70	30	
		115	75	
		100	60	
		100	60	
	Di minyak	80	40	
		<i>Silver-coated atau nickel-coated</i> — Di udara	115	75
			125	85
			105	65
			115	75
125	85			
— Di SF ₆ (lihat poin5)	115	75		
—	125	85		

	<i>Tin-coated</i> (lihat poin6) — Di udara — — Di SF ₆ (lihat poin5) —	105 115 105 125	65 75 65 85
3	<i>Terminal for the connection to external conductors by screws or bolts</i> (lihat poin 8 dan 14)	(lihat poin 14)	(lihat poin14)
5	Minyak untuk peralatan saklar minyak (lihat poin 9 dan 10)	90	50
6	Beberapa bagian dari metal atau material isolasi pada kontak dengan minyak, <i>except contacts</i>	100	60
7	<i>Accessible parts</i> — <i>Expected to be touched during normal operation...</i> — <i>Which need not be touched during normal operation.....</i> — <i>External surface of enclosures (public accessible enclosures only).....</i> — <i>External surfaces not accessible to an operator during the normal course of duties.....</i>	catatan 5 catatan 5 110 105 110	70 - - -
10	Bagian lainnya yang mengalirkan arus — tembaga atau tembaga campuran <i>casting</i> — <i>Hard-drawn copper parts</i> (lihat catatan 7) — bagian aluminium yang dipanasi	105 80 105	65 40 65

Sumber: IEEE Std 1247-2005

Tabel 2.2 menunjukkan adanya perbedaan standar temperatur yang diizinkan pada konduktor yang memiliki sifat material berbeda-beda. Standar temperatur maksimal juga dipengaruhi oleh jenis isolasi yang digunakan, misalnya isolasi menggunakan gas SF₆, udara, ataupun minyak. Pada Tabel 2.2 tersebut terdapat beberapa catatan – catatan, untuk mengetahui penjelasan dari catatan – catatan tersebut maka dapat dilihat pada lampiran.

Penentuan temperatur maksimal yang diizinkan juga dipengaruhi oleh pemilihan kelas isolasi, pembagian temperatur pada kelas – kelas isolasi ditunjukkan oleh Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kelas temperatur isoalsi dan kenaikan temperatur pada beberapa bagian, material, dan dielektrik pada *switchgear* tegangan tinggi

sifat dasar bagian, material, dan dielektrik (lihat catatan dibaahnya)	Nilai Maksimal	
	Temperatur (°C)	Kenaikan temperatur pada temperatur lingkungan yang tidak melebihi 40 °C (K)
Material yang digunakan sebagai isolasi dan bagian – bagian metal pada kontak dengan isolasi yang terbagi dalam kelas – kelas berikut (lihat poin 12)		
– Y	90	50
– A	105	65
– E	120	80
– B	130	90
– F	155	115
– Enamel: oil base	100	60
Synthetic	120	80
– H	180	140
– C other insulating material	(lihat poin 13)	(lihat poin 13)

Sumber: IEEE Std C37.100.1

Tabel 2.3 tersebut menunjukkan bahwa terdapat berbagai macam kelas isolasi yang bisa digunakan. Apabila diinginkan temperatur maksimal yang diizinkan untuk diterapkan pada konduktor yang mempunyai nilai temperatur yang lebih besar atau lebih kecil dari standar yang ditunjukkan pada Tabel 2.3, maka yang perlu dilakukan adalah merubah kelas isolasi material. Untuk kelas isolasi material C yang mempunyai kenaikan temperatur yang berbeda dengan lainnya, disarankan melihat poin 13 pada standar dan dapat dilihat pada lampiran, poin 13 tersebut dapat diartikan bahwa temperatur konduktor hanya dibatasi oleh kebutuhan untuk tidak menyebabkan kerusakan pada bagian sekitarnya.

Konduktor *busbar* dipisahkan dari penutupnya dengan media berupa gas yang berperan dalam pengaturan jarak antara keduanya. Perancangan tekanan medan listrik maksimum akan berkurang dengan rendahnya gradien pada isolasi padat. Gradien maksimum yang diizinkan untuk digunakan pada cor isolasi epoxy resin pada GIS adalah 3 sampai 4 kV/mm. Persamaan untuk besarnya gradien yang diizinkan adalah: (M.S Naidu, 2008:57).

$$E_s = \frac{1,2 \cdot \frac{V}{\sqrt{3}}}{(D-d)/2} \quad (2-5)$$

Atau jika ditentukan $E_s = 3$, maka:

$$D = 0,73V$$

Dengan:

E_s : Gradien tegangan.

V : V rms antar fasa.

D : Diameter penutup.

d : Diameter konduktor.

Penentuan dimensi dari *busbar* juga harus disesuaikan dengan standar dimensi yang telah ada. Dasar penentuan dimensi *busbar* adalah diketahuinya nilai luas penampang, apabila nilai dari luas penampang diketahui maka kemampuan hantar arus pada konduktor dapat dilihat pada Tabel yang ditunjukkan oleh Tabel 2.4 dan Tabel 2.5

Tabel 2.4 Luas penampang dan kuat hantar arus konduktor tabular tembaga

D_1 (mm)	a (mm)	A (mm ²)	Material	KHA (A)
20	2	113	E-Cu F 37	384
	3	160	E-Cu F 37	457
	4	201	E-Cu F 30	512
	5	236	E-Cu F 30	554
	6	264	E-Cu F 25	591
	32	2	188	E-Cu F 37
3		273	E-Cu F 37	725
4		352	E-Cu F 30	821
5		424	E-Cu F 30	900
6		490	E-Cu F 25	973
40		2	239	E-Cu F 37
	3	349	E-Cu F 37	899
	4	452	E-Cu F 30	1020
	5	550	E-Cu F 30	1130
	6	641	E-Cu F 25	1220
	50	3	443	E-Cu F 37
4		578	E-Cu F 30	1270
5		707	E-Cu F 30	1410
6		829	E-Cu F 25	1530
8		1060	E-Cu F 25	1700
63		3	564	E-Cu F 30
	4	741	E-Cu F 30	1590

D_1 (mm)	a (mm)	A (mm ²)	Material	KHA (A)
	5	911	E-Cu F 30	1760
	6	1070	E-Cu F 25	1920
	8	1380	E-Cu F 25	2150
80	3	726	E-Cu F 30	1750
	4	955	E-Cu F 30	2010
	5	1180	E-Cu F 30	2230
	6	1400	E-Cu F 25	2430
	8	1810	E-Cu F 25	2730
100	3	914	E-Cu F 30	2170
	4	1210	E-Cu F 30	2490
	5	1490	E-Cu F 30	2760
	6	1770	E-Cu F 25	3020
	8	2310	E-Cu F 25	3410

Sumber: ABB

Keterangan Tabel 2.4:

D_1 : diameter luar konduktor (mm)

a : ketebalan konduktor (mm)

A : luas penampang konduktor (mm²)

KHA : kuat hantar arus konduktor terlapisi (A)

Sedangkan kuat hantar arus konduktor yang menggunakan material aluminium ditunjukkan oleh Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Luas penampang dan kuat hantar arus konduktor tabular aluminium

D_1 (mm)	a (mm)	A (mm ²)	Material	KHA (A)
20	2	113	E-Al F 10	305
	3	160	E-Al F 10	363
	4	201	E-Al F 10	407
	5	236	E-Al F 10	440
	6	264	E-Al F 10	465
32	2	188	E-Al F 10	478
	3	273	E-Al F 10	575
	4	352	E-Al F 10	653
	5	424	E-Al F 10	716
	6	490	E-Al F 10	769
40	2	239	E-Al F 10	591
	3	349	E-Al F 10	714
	4	452	E-Al F 10	813
	5	550	E-Al F 10	896
	6	641	E-Al F 10	966
50	4	578	E-Al F 10	1010
	5	707	E-Al F 10	1120
	6	829	E-Al F 10	1210
	8	1060	E-Al F 10	1370
	10	1260	E-Al F 10	1490
63	4	741	E-Al F 10	1270
	5	911	E-Al F 10	1400
	6	1070	E-Al F 10	1520

D_1 (mm)	a (mm)	A (mm ²)	Material	KHA (A)
	8	1380	E-Al F 10	1730
80	4	955	E-Al F 10	1600
	5	1180	E-Al F 10	1770
	6	1400	E-Al F 10	1920
	8	1810	E-Al F 10	2200
	10	2200	E-Al F 10	2410
100	4	1210	E-Al F 10	1980
	5	1490	E-Al F 10	2200
	6	1770	E-Al F 10	2390
	8	2310	E-Al F 10	2740
120	4	1460	E-Al F 10	2360
	5	1810	E-Al F 10	2620
	6	2150	E-Al F 10	2850
	8	2820	E-Al F 10	3270
	10	3460	E-Al F 10	3590
160	4	1960	E-Al F 10	3110
	5	2440	E-Al F 10	3460
	6	2900	E-Al F 10	3780
	8	3820	E-Al F 10	4340
	10	4710	E-Al F 10	4760

Sumber: ABB

Keterangan Tabel 2.5:

- D_1 : diameter luar konduktor (mm)
 a : ketebalan konduktor (mm)
 A : luas penampang konduktor (mm²)
 KHA : arus konduktor terlapisi (A)

Hal yang tak kalah penting adalah penutup (*enclosuer*) dimana penutup pada *busbar* yang terisolasi oleh gas SF₆ merupakan sebuah kerangka yang mengelilingi atau rumah yang digunakan untuk melindungi konduktor dan juga untuk menjaga kesetabilan tekanan gas yang berada didalamnya. Penutup biasanya dibentuk dari bahan aluminium atau baja, pada penutup yang terbuat dari bahan baja harus di cat terlebih dahulu bagian dalamnya dan bagian luarnya juga harus di lindungi. Sedangkan untuk penutup yang berasal dari bahan aluminium tidak membutuhkan pengecatan tetapi dapat juga dicat untuk mempermudah saat membersihkan, memperindah tampilan, atau untuk memaksimalkan perpindahan panas ke luar.

Perancangan penutup juga harus diperhatikan agar penutup dapat menahan tekanan yang menyimpannya, terutama kemampuan penahanan tekanan mekanik karena hal tersebut menentukan ketebalan minimal dari penutup metal pada *busbar* yang terisolasi gas SF₆. Pada Tabel 2.6 ditunjukkan hubungan antara tegangan terhadap dimensi penutup dan konduktor *busbar* yang didasarkan pada CIGT.

Tabel 2.6 Hubungan antara tingkat tegangan dan dimensi *busbar*

Tingkat tegangan (kV)	A (mm) Diameter luar konduktor	B (mm) Ketebalan konduktor	C (mm) Ketebalan penutup	D (mm) Diameter dalam penutup	E (mm) Diameter total & coating
72.5	51	12.7	6.4	165	229
145/172	89	15.2	7.6	241	343
242/300	102	12.7	7.6	307	406
362	127	12.7	6.4	375	483
420	152	12.7	6.4	470	610
550	178	12.7	6.4	508	648
800	178	12.7	6.4	622	749
1200	203	12.7	9.5	762	889

Sumber: CIGT

Tabel 2.6 menunjukkan bahwa tingkat tegangan mempunyai pengaruh besar terhadap penentuan dimensi *busbar* yang terisolasi oleh gas SF₆. Apabila tingkat yang dikenakan pada *busbar* besar maka dimensi keseluruhan akan ikut membesar pula.

Pengaruh tekanan gas SF₆ ini dapat mempengaruhi ketebalan dari penutup *busbar* yang dapat dinyatakan dalam persamaan: (Edwin H. Young dan Loyd E. Brownel, 254)

$$t = \frac{p \cdot r_i}{fE - 0,6p} \quad \text{dalam satuan inci} \quad (2-6)$$

Dengan:

t : Ketebalan vassel (inci)

r_i : Jari – jari dalam penutup (inci)

p : Tekanan internal (psi)

E : Efisiensi penghubung

f : Tekanan maksimum yang diizinkan (psi)

Persamaan 2-6 menunjukkan pengaruh besarnya tekanan dari dalam terhadap ketebalan dinding penutup. Ketebalan dinding penutup juga dipengaruhi oleh jari – jari dalam penutup. Pada persamaan 2-6 tersebut juga terdapat tekanan maksimum yang

diizinkan, dan nilai dari tekanan maksimum yang diizinkan dapat dilihat pada standar ASME. Besar kecilnya nilai dari tekanan maksimum yang diizinkan dipengaruhi oleh bahan yang digunakan.

Sedangkan Material penyusun konduktor *busbar* biasanya dibagi atas dua jenis, yaitu konduktor *busbar* yang menggunakan material aluminium dan konduktor *busbar* yang menggunakan material tembaga. Diantara kedua material tersebut terdapat berbagai perbedaan sifat yang menjadi dasar atas pemilihan material konduktor *busbar* yang ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Karakteristik material tembaga dan aluminium

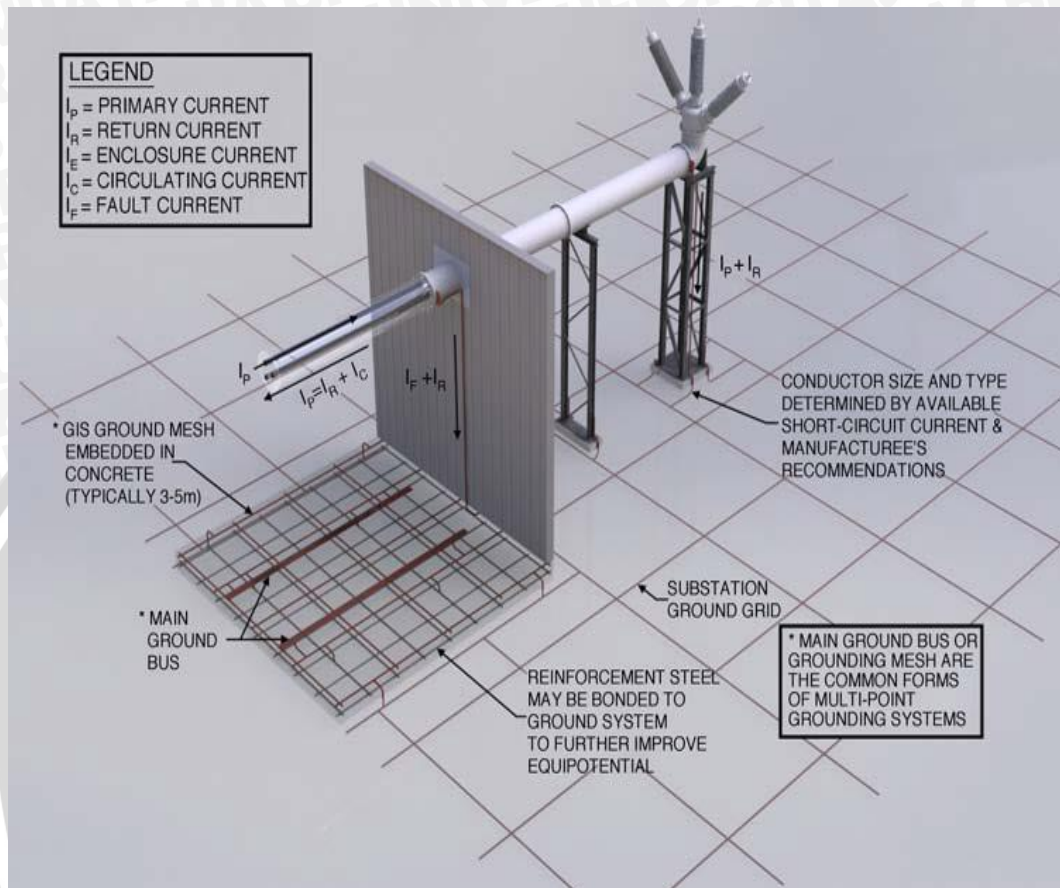
Sifat	Tembaga (lb)	Aluminium (lb)
Berat untuk konduktivitas yang sama	100	54
luas penampang untuk konduktivitas yang sama	100	156

Sumber: *GE Consumer & Industrial*

Dari kedua material tersebut ditunjukkan bahwa pada konduktivitas yang sama material tembaga memiliki berat sebesar 100 lb sedangkan material aluminium memiliki berat yang lebih ringan yaitu sebesar 54 lb, jadi material aluminium memiliki berat yang lebih ringan dari pada material tembaga. Sedangkan untuk luas penampang, material aluminium pada konduktivitas yang sama memiliki luas penampang yang lebih luas dari pada tembaga, sehingga dalam menghantarkan arus maka material tembaga lebih menguntungkan karena hanya membutuhkan luas penampang yang tidak sebesar luas penampang aluminium.

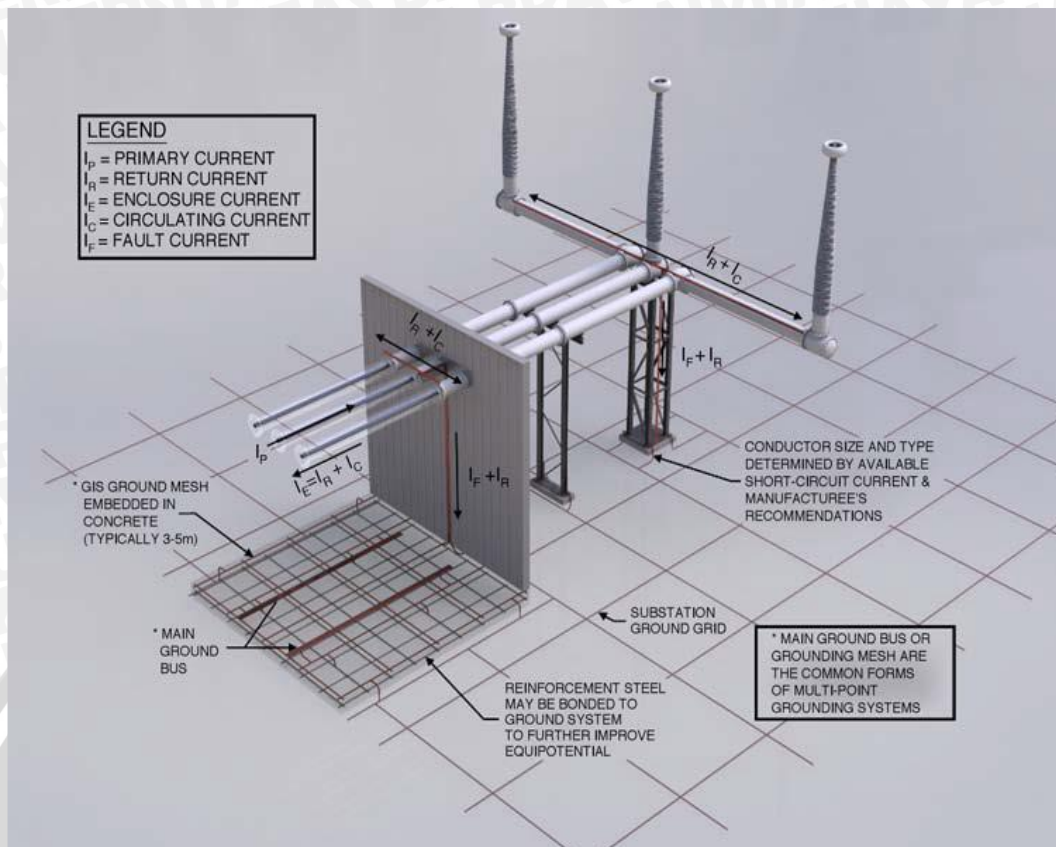
Aluminium cocok digunakan untuk material *busbar* di dalam GIS (*Gas Insulated Switchgear*). Aluminium mempunyai sifat yang lebih baik dibandingkan dengan tembaga, pengecualian untuk sifat konduktivitas dari tembaga yang lebih baik dari pada aluminium. Aluminium juga lebih murah tetapi sifat mekanik aluminium tidak lebih baik dibandingkan baja. Untuk aluminium murni bagus digunakan sebagai konduktor sedangkan untuk penutup baiknya menggunakan aluminium campuran (M.S. Naidu, 2008: 59).

Pada konstruksi *busbar* yang terisolasi gas SF₆ juga perlu diperhatikan bahwa penutup metal yang dirancang juga mengalirkan arus balik yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3 dan Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Busbar tiga fasa pada satu tabung dengan arus penutup
Sumber: Herman J Kock, 2014:63

Gambar 2.3 menunjukkan adanya susunan *busbar* tiga fasa yang diletakkan pada tabung. Konduksi tegangan yang dihasilkan oleh tegangan pada *busbar* menghasilkan arus balik yang mengalir pada penutup tabung. Besar nilai arus balik pada penutup metal menurut Herman J Kock mencapai 90% dari arus operasi pada konduktor. Prihal tersebut juga berlaku pada *busbar* tiga fasa yang disusun seperti Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Busbar satu fasa pada satu tabung dengan arus penutup

Sumber: Herman J Kock, 2014:63

Gambar 2.4 menunjukkan busbar yang disusun pada penutup dengan pembagian pada tiap penutup terdiri dari satu fasa busbar. Pada busbar satu fasa pada satu tabung yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4 memiliki nilai arus balik tiap – tiap tabung yaitu 90% dari arus yang mengalir pada tiap – tiap fasa busbar yang ada didalamnya.

2.5 Coating

Coating merupakan proses yang digunakan untuk melindungi metal dari pengaruh lingkungan sekitar dengan cara melapisi metal tersebut dengan material lain. Telah diketahui bahwa busbar yang terisolasi gas SF₆ tersusun atas material metal, oleh karena itu metal tersebut harus dilindungi agar tetap efektif bekerja sesuai dengan tugasnya masing – masing, dikarenakan hal tersebut maka di perlukan coating pada metal.

Material yang digunakan untuk coating terdiri atas berbagai macam material diantaranya yaitu coating menggunakan matererial sebagai berikut:

- a. Karet
- b. Plastik

- c. Kaca
- d. Epoxy resin

Berbagai material pelapis tersebut harus dianalisis terlebih dahulu agar didapatkan material yang sesuai untuk digunakan sebagai pelapis metal pada *busbar* yang terisolasi gas SF₆. Analisis berbagai material tersebut dapat dilihat pada penjabaran berikut ini:

- a. Lapisan karet

Lapisan karet merupakan lapisan yang hanya mampu beroperasi untuk melindungi metal pada suhu dibawah 50⁰C. Namun ada yang disebut karet sintetis, karet sintetis tersebut mampu beroperasi hingga mencapai suhu 100⁰C. Akan tetapi pelapis karet tidak mampu lagi beroperasi pada suhu yang mencapai 200⁰C, dan juga lapisan karet ini tidak mampu untuk melindungi benda yang dilapisinya dibawah tekanan proses oksidasi yang tinggi.

- b. Lapisan plastik

Lapisan plastik dapat mencegah terjadinya proses korosi pada metal. Lapisan plastik mampu beroperasi pada suhu 260⁰C sampai -270⁰C.

- c. Lapisan kaca

Lapisan kaca ini biasanya digunakan untuk melindungi permukaan metal – metal yang digunakan pada aktifitas kimia, lapisan kaca ini biasanya dikaitkan pada baja ringan. Lapisan kaca ini mampu bekerja hingga mencapai suhu sekitar -20⁰C sampai 250⁰C.

- d. Lapisan epoxy resin

Lapisan ini biasanya digunakan untuk melindungi pipa yang terbuat dari baja karbon yang memiliki tingkat korosif yang rendah dan mempunyai suhu yang sedang – sedang saja. Lapisan epoxy resin ini biasanya digunakan untuk melapisi pipa gas.

2.6 Isolasi Udara

Udara dan gas merupakan bahan isolasi yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik pada tegangan tinggi. Isoalsi berfungsi untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar – penghantar tersebut tidak terjadi lompatan listrik (*flashover*) atau percikan (*sparkover*).

Untuk tegangan yang semakin tinggi maka dibutuhkan bahan isolasi yang memiliki kekuatan dielektrik besar. Apabila tegangan yang diterapkan mencapai tingkat ketinggian tertentu maka bahan isolasi tersebut mengalami pelepasan muatan (lucutan atau *discharge*), yang merupakan suatu bentuk kegagalan listrik. Kegagalan ini menyebabkan hilangnya tegangan dan mengalirnya arus dalam bahan isolasi (Arismunandar, 1983:5).

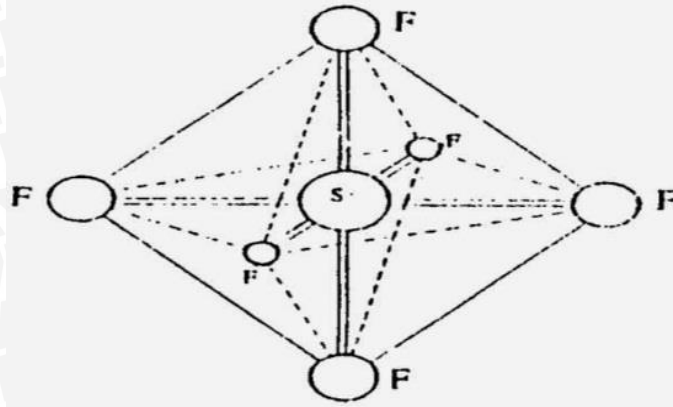
Udara ideal adalah gas yang hanya terdiri dari molekul – molekul netral, sehingga tidak dapat mengalirkan arus listrik. Tetapi didalam kenyataannya udara yang sesungguhnya tidak hanya terdiri dari molekul – molekul netral saja tetapi ada sebagian kecil ion – ion dan elektron – elektron bebas yang terdapat pada udara, yang mengakibatkan udara dan gas mengalirkan arus walaupun terbatas.

Jika diantara elektroda diterapkan suatu tegangan V , maka akan timbul suatu medan listrik E yang mempunyai besar dan arah tertentu. Di dalam medan listrik, elektron – elektron bebas akan mendapat energi yang cukup kuat, sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi.

Terjadinya proses ionisasi bisa diakibatkan oleh adanya benturan elektron. Jika gradien tegangan yang diionisasikan cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan lebih banyak dibandingkan jumlah ion yang ditangkap menjadi molekul oksigen. Tiap – tiap elektron ini berjalan menuju anoda secara terus menerus, sambil membuat benturan – benturan yang kemudian membebaskan lebih banyak elektron. Ionisasi karena benturan ini merupakan proses yang paling penting dalam kegagalan pada udara atau gas.

2.6.1 Isolasi gas SF₆

Sulfur heksaflorida adalah gas yang digunakan untuk melindungi peralatan daya listrik. Sulfur heksaflorida ini memiliki kekuatan dielektrik yang lebih besar dari pada udara. Sulfur heksaflorida adalah gas yang tidak beracun, tidak berwarna, tidak berbau, hambar, dan tidak mudah terbakar. Gas ini disusun oleh atom sulfur dan dikelilingi oleh enam atom fluor. Susunan molekul gas SF₆ ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Struktur molekul gas SF₆

Sumber: Dieter Kind, 1993: 8

Gambar 2.5 menunjukkan bahwa molekul gas SF₆ terbentuk sedemikian rupa sehingga atom belerang berada pada setiap ujung oktahedron yang tersusun dengan masing – masing sebuah atom flour pada setiap ujung okatahedron.

Sedangkan untuk karakteristik dari gas SF₆ dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Karakteristik fisika dari gas SF₆

Berat molekul	146,05
Titik cair	-50,8 °C
Suhu Menyublim	-63,9 °C
Massa jenis (cairan)	
Pada 50 °C	1,98 g/ml
Pada 25 °C	1,329 g/ml
Massa jenis gas (tekanan 1 bar 20 °C)	6,164 g/l
Suhu kritis	45,6 °C
Massa jenis kritis	0,755 g/ml
Tekanan kritis	36,557 atm
Tekanan permukaan (-50 °C)	11,63 dyn/cm
Konduktifitas termal (10 ⁴)	3,36 (cal/s)(cm/K)
Viskositas gas (25 ⁰ C x 10 ⁴)	1,61 poise
Titik didih	-63 °C
Kerapatan relatif (udara =1)	5,1
Tekanan menguap	10,62 bar
Panas spesifik (30 °C)	0,143 cal/g

Sumber: V. N. Maller and M. S. Naidu, 1981: 2

Berdasarkan Tabel 2.8 menunjukkan sifat dari gas SF₆. Gas SF₆ memiliki berat molekul 146.06, dengan nilai berat molekul yang besar mengakibatkan gas SF₆ bergerak sangat lambat saat terjadi ionisasi. Apabila sifat dari dielektrik gas SF₆ dibandingkan dengan gas yang lainnya maka akan dihasilkan nilai – nilai seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Berbagai jenis gas dan karakteristiknya

Data for p = 0.1 MPa		Dielectric strength $\theta = 20^\circ\text{C}$	Relative molecular mass	Density $\theta = 20^\circ\text{C}$	Mean free path of electrons	Ionization energy	Normal condensation temperature
Gas or Vapour	Symbol	E_0 kV/cm	M	ρ kg/m ³	λ_c μm	W_i eV	θ_c $^\circ\text{C}$
Helium	He	3.7	4	0.17	1.10	24.6	-269
Neon	Ne	4.2	20	0.87	0.70	21.5	-246
Argon	Ar	6.5	40	1.73	0.39	15.7	-186
Krypton	Kr	8.8	84	3.59	0.30	14.0	-153
Hydrogen*	H ₂	15	2	0.09	0.65	15.8	-243
Methane	CH ₄	21	16	0.72	0.29	13.1	-162
Carbondioxide	CO ₂	25	45	1.91	0.24	14.4	-29
Oxygen*	O ₂	27	32	1.38	0.40	12.1	-183
Water vapour	H ₂ O	≈30	18	0.78**	—	13.0	+100
Air	—	32	(29)	1.25	0.37	—	-193
Nitrogen	N ₂	33	28	1.21	0.35	15.7	-196
Tetra fluoromethane*	CF ₄	36	88	3.81	—	15.4	—
Nitrogen oxide	NO ₂	40	44	1.94	0.24	12.9	-90
Carbonmonoxide	CO	42	28	1.24	0.36	14.1	-192
Chlorine*	Cl ₂	52	71	3.22	0.16	11.8	-34.6
Sulphurdioxide*	SO ₂	64	64	2.93	0.17	13.4	-10
Freon*	CCl ₂ F ₂	80	121	5.33	0.30	≤18.0	-28
Sulphurhexafluoride*	SF ₆	89	146	6.39	0.22	15.9 to 19.3	-63
Seleniumhexafluoride*	SeF ₆	144	193	≈8.2**	—	—	+49
Tetrachloromethane*	CCl ₄	180	154	6.65**	0.08	11.1	+77
Fluorine*	F ₂	—	18	1.695	—	16.5	-188

* electronegative gases.

** $\theta = \theta_c$.

1 eV = 1.602×10^{-19} J.

Sumber: Ravinda Arora & Wolfgang Mosch, 2011: 177

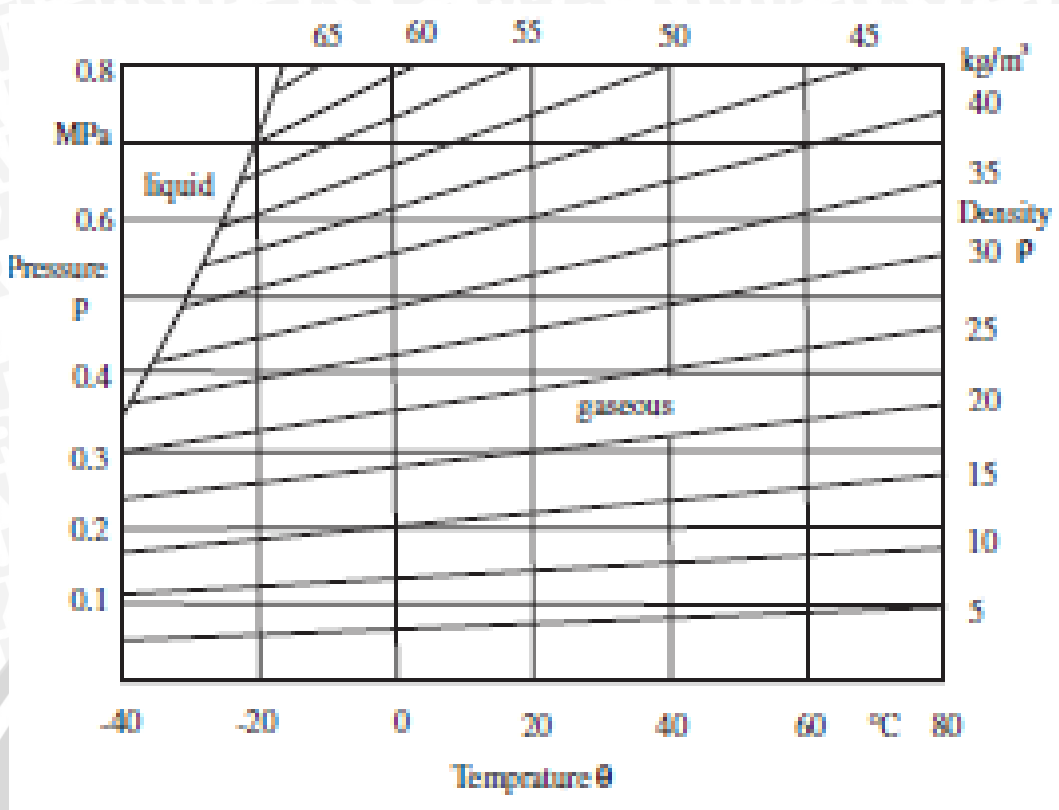
Dari Tabel 2.9 terlihat dua gas yang sering digunakan untuk isolasi yaitu udara dan gas SF₆. Berdasarkan Tabel 2.9 gas SF₆ mempunyai kekuatan dielektrik tiga kali lebih besar dibandingkan dengan udara, massa molekul relatif yang lebih besar dibandingkan dengan udara mengakibatkan massa jenis juga lebih besar dibandingkan dengan udara sehingga jarak bebas gas SF₆ lebih sempit dibandingkan udara, sehingga proses pembawaan muatan akan lebih pendek. Oleh karena itu gas SF₆ cocok untuk digunakan sebagai dielektrik yang handal dalam mengisolasi peralatan tegangan tinggi. Tetapi gas ini memiliki kelemahan dalam hal batas suhu kondensasi, karena gas SF₆ mempunyai batas suhu kondensasi sebesar – 63⁰C sedangkan udara -193⁰C.

Kekuatan dielektrik dari gas SF₆ pada tekanan atmosfer adalah 2.3 kali dari udara dan 30% lebih rendah dari dielektrik minyak yang digunakan pada CB (*Circuit Breaker*). Pada tekanan yang lebih tinggi kekuatan dielektrik dari gas SF₆ akan naik. Pada tekanan sekitar 3 kg/cm² kekuatan dielektrik SF₆ akan menjadi lebih besar dari pada minyak. Oleh karena itu ukuran peralatan menjadi lebih kecil untuk tegangan yang memiliki nilai yang sama. Gas SF₆ merupakan gas yang mempunyai kemampuan yang sangat handal untuk memadamkan busur api.

2.6.2 Tekanan Gas

Walaupun gas SF₆ kekuatan dielektriknya naik sebanding dengan kenaikan tekanan, tetapi gas tersebut memiliki nilai saturasi yang apabila gas tersebut lampau maka gas SF₆ berubah wujud menjadi cair. Kenaikan tekanan gas tersebut dapat dipengaruhi oleh kenaikan temperatur. Dalam keadaan suatu sistem sedang beroperasi, penguapan gas ini harus dihindari karena dapat menurunkan kekuatan isolasi dari gas SF₆.

Pada Gambar 2.6 ditunjukkan pengaruh dari kenaikan suhu terhadap tekanan dan kerapatan gas.



Gambar 2.6 Hubungan antara tekanan, suhu dan kerapatan dari gas SF₆.

Sumber: Ravinda Arora & Wolfgang Mosch, 2011:179

Pada Gambar 2.6 dapat dilihat bahwa peningkatan suhu mengakibatkan sedikit perubahan kenaikan tekanan pada fase gas, dan pada saat suhu - 40°C dengan kenaikan tekanan pada titik optimal mengakibatkan gas SF₆ berubah menjadi cair.

Pada susunan silinder koaksial, besar – kecilnya tekanan gas dapat mempengaruhi besarnya medan kritis yang mampu ditahan yang ditunjukkan oleh persamaan (2-7) dan (2-8) menurut Y. Kawaguci, K. Sakata, dan S. Menju sebagai berikut:

$$E_{AC} = 42. p + 38 \text{ kV/cm}, \tag{2-7}$$

Persamaan (2-7) digunakan untuk ketahanan tegangan frekuensi jala – jala 50 Hz.

$$E_{imp} = 45. p + 35 \text{ kV/cm}, \tag{2-8}$$

Persamaan (2-8) digunakan untuk ketahanan tegangan impuls.

Dengan:

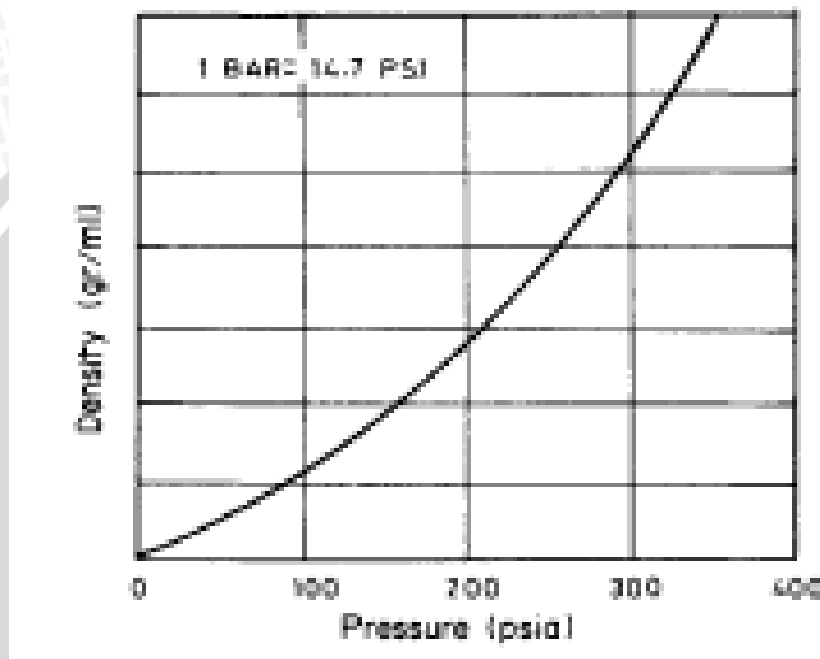
E_{AC} : Ketahanan medan frekuensi jala –jala.

E_{imp} : Ketahanan medan implus.

p : Tekanan gas SF₆.

2.6.3 Kerapatan gas SF₆

Pada Gambar 2.7 ditunjukkan hubungan antara kenaikan tekanan dan kerapatan gas.



Gambar 2.7 Hubungan tekanan terhadap kerapatan gas SF₆

Sumber: V. N. Maller and M. S. Naidu, 1981: 6

Kerapatan gas SF₆ sebanding dengan 6,164 gram per liter pada suhu 20⁰ C dan bertekanan 760 torr. Pada Gambar 2.7 menunjukkan bahwa kenaikan tekanan gas berpengaruh terhadap kenaikan kerapatan gas.

2.7 Sifat Kimia gas SF₆

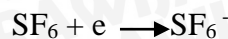
Sifat kimia dari gas SF₆ dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Setabil saat terjadi tumbukan sampai suhunya mencapai 500⁰ C.
- Lambam (*inert*).

Dengan sifat lambam yang dimiliki oleh gas SF₆ dapat memberikan keuntungan apabila digunakan untuk mengisolasi *switchgear* karena menyebabkan umur dari bagian

- bagian kontak dapat bertahan lebih lama. Gas SF₆ disebut sebagai gas elektronegatif yaitu gas yang memiliki kemampuan untuk menangkap elektron bebas yang ada pada saat terjadi pembusuran. Penangkapan elektron oleh gas SF₆ ini menghasilkan ion negatif. Proses penangkapan elektron dapat terjadi dalam dua jalan yaitu:

- i. Penangkapan langsung



- ii. Penangkapan tidak langsung



Ion – ion ini lebih berat sehingga tidak efektif dalam media pembawa arus akibatnya gas ini mempunyai kekuatan dielektrik lebih tinggi dari gas lain.

- c. Tidak bereaksi dengan material lain sampai suhu 500° C.

2.8 Kemampuan Memindah Panas

Kemampuan memindah panas gas SF₆ adalah 2 sampai 2, 5 kali dari udara pada tekanan yang sama. Oleh karena itu untuk ukuran konduktor yang sama, kemampuan dilewati arus akan lebih besar bila konduktor menggunakan gas SF₆ sebagai media isolasinya.

2.9 Enthalpi

Kapasitas panas pada gas SF₆ pada temperatur dibawah 6000°K lebih tinggi dari pada gas nitrogen. Hal ini dapat membantu proses pendinginan pada ruang busur api setelah arus nol.

2.10 Mekanisme Breakdown Gas SF₆ pada Medan Seragam dan Medan yang Tidak Seragam

Gas SF₆ mempunyai muatan penyusun berupa proton dan elektron, muatan negatif yang dimiliki gas SF₆ sama seperti muatan positif, muatan tersebut terlalu besar dan lambat untuk menyebabkan ionisasi pada saat tabrakan. Molekul gas yang memiliki atom halogen dalam strukturnya mempunyai kemampuan untuk menangkap elektron bebas dan membentuk ion negatif. Sifat elektron di dalam gas yang elektronegatif menggambarkan suatu cara yang efektif untuk menyerap elektron yang seharusnya telah berkontribusi pada pembentukan banjir longoran.

Teori Townsends yang menjelaskan pembentukan longoran di udara pada dasarnya merupakan gas yang elektropositif, oleh karena itu karakteristik peluahan listrik pada gas SF₆ sedikit berbeda dengan gas pada umumnya. Tetapi teori Townsends telah dimodifikasi sedikit untuk menyesuaikan sifat elektron pada gas yang elektronegatif (Ravindra Arora & Wolfgang Mosch, 2011:180).

Proses tembus dalam gas ini dimulai oleh suatu penumpukan elektron yang besar. Proses peningkatan jumlah elektron oleh proses ionisasi terjadi pada daerah dengan harga koefisien ionisasi α yang melebihi harga koefisien pelekatan η_a . Koefisien pelekatan η_a didefinisikan sebagai jumlah pelekatan tabrakan yang dilakukan oleh satu elektron yang melayang sejauh 1 cm ke arah medan. Ionisasi oleh tabrakan elektron dilambangkan oleh koefisien ionisasi yang efektif.

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta_a$$

Seperti α/p , $\bar{\alpha}/\bar{p}$ juga merupakan fungsi dari E/p . Hubungan antara medan seragam dengan koefisien tersebut dapat ditunjukkan oleh persamaan: (Ravindra Arora & Wolfgang Mosch, 2011:180)

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = K \left(\frac{\bar{E}}{p} - \left(\frac{E_b}{p} \right)_i \right) \quad (2-9)$$

Dengan:

\bar{E} = kuat medan listrik setempat (kV cm⁻¹).

p = tekana gas (kgf/cm²).

$\left(\frac{E_b}{p} \right)_i$ = harga kritis dari $\left(\frac{E}{p} \right)$ saat sebelum terjadi *breakdown*.

K = 27 kV cm⁻¹

$\left(\frac{E_b}{p} \right)_i$ = 890 k V cm⁻¹. MPa

Pada tekanan atmosfer dan suhu 20⁰C intensitas medan yang didapatkan adalah:

$$E_{bi} = \left(\frac{E_b}{p} \right)_i \cdot p = 890 \frac{kV}{cm} \cdot MPa$$

Pada tekanan atmosfer (1 atm) sebanding dengan 0,1 MPa pada suhu 20⁰ C, sehingga besarnya intensitas medan $E_{bi} = 89 \text{ kV/cm}$, nilai tersebut merupakan besarnya intensitas medan yang dibutuhkan untuk mendahului proses tembus pada gas SF₆.

Dengan adanya proses pelekatan elektron maka pertumbuhan arus *steady state* rata – rata pada medan seragam sebelum terjadi *breakdown* pada gas SF₆ dapat dirumuskan pada persamaan (2-10).

$$I = \frac{I_0 \left[\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} e^{\bar{\alpha}d} - \frac{\eta_a}{\bar{\alpha}} \right]}{1 - \gamma \alpha / \bar{\alpha} [e^{\bar{\alpha}d} - 1]} \quad (2-10)$$

Dengan α adalah koefisien ionisasi primer dan γ adalah koefisien ionisasi sekunder dari mekanisme Townsends.

Dengan cara yang sama, seperti pada mekanisme tembus Townsends. Pada mekanisme tembus untuk gas yang elektronegatif dapat dilihat pada persamaan (2-10) yang dihasilkan dengan cara membuat penyebut bernilai 0 sehingga menghasilkan:

$$\gamma \alpha / \bar{\alpha} [e^{\bar{\alpha}d} - 1] = 1$$

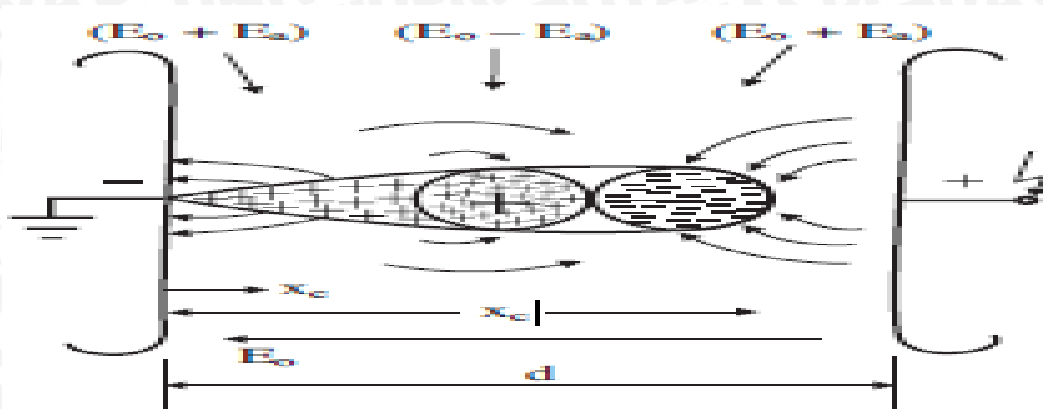
Selama $\alpha \geq \eta_a$ tembus akan terjadi, dan nilai kritis dari medan listrik terjadi apabila $\alpha = \eta_a$.

Untuk mekanisme Paschen yang terjadi pada gas SF₆, persamaan diatas telah diuji coba terhadap nilai yang rendah untuk menghasilkan tekanan dan jarak pemisah (pd). Untuk nilai yang tinggi pada (pd), data yang telah didapatkan dilaporkan bertentangan dengan persamaan diatas. Perbedaan pendapat seperti yang ditunjukkan oleh Zaengl berhubungan dengan ketergantungan yang kuat dari koefisien γ pada tekanan gas dan efek elektroda, karena semua proses umpan balik sekunder diwakili oleh koefisien γ .

Dapat disimpulkan bahwa pada gas yang elektronegatif, tembus yang terjadi pada medan seragam didalam gas SF₆ untuk jarak pemisah yang pendek juga dihasilkan melalui proses longoran pada mekanisme Townsends.

Untuk nilai pd yang besar maka mekanisme tembus yang terjadi adalah mekanisme Streamer yang didasari oleh mekanisme longoran elektron tunggal. Syarat tembus pada tekanan yang tinggi didasarkan pada jumlah elektron kritis (n_{cr}) yang diproduksi didalam longoran. Jumlah elektron kritis sekitar 10⁸ yang dicapai didalam

longsor dalam medan searah saat mencapai panjang kritis (x_c). Proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pengaruh medan muatan ruang (E_a) terhadap longsor saat penguatan kritis diterapkan pada medan seragam (E_0)

Sumber: (Ravindra Arora & Wolfgang Mosch, 2011:110)

Pada Gambar 2.8 ditunjukkan hubungan antara muatan ruang dan polaritas elektroda yang dapat menghasilkan penyimpangan pada medan seragam. Intensitas medan kearah kepala dan ekor longsor menghasilkan nilai $(E_0 + E_a)$, sedangkan diatas wilayah ion positif tepat dibelakang kepala, medan yang dihasilkan sebesar $(E_0 - E_a)$. Dengan E_a adalah medan pada muatan ruang sedangkan E_0 adalah medan luar yang diterapkan. Dan jelas terlihat bahwa muatan ruang didalam longsor bertambah kuat dengan meningkatnya panjang dari longsor tersebut.

Dari Gambar 2.8 terdapat x_c yang merupakan panjang sebuah longsor atau dapat juga disebut panjang kritis pada cela elektroda, dan mekanisme streamer akan terjadi saat $d \geq x_c$.

Pada prakteknya, jarak cela pada medan tidak seragam yang lemah lebih menguntungkan. Untuk beberapa jarak cela, kriteria tembus dari mekanisme Streamer dapat diperluas, dengan mempertimbangkan koefisien pelekatan dari gas yang elektronegatif. Dimulai dengan kemunculan elektron tunggal ($n_0 = 1$), jumlah pembawa muatan dalam longsor dengan mempertimbangkan pelekatan elektron dapat di gambarkan berdasarkan rumus (2-11).

$$n = \exp \int_0^x \bar{\alpha} dx \quad (2-11)$$

Dan untuk penguatan kritis pada longsor, yang memicu kemunculan mekanisme Steramer adalah:

$$n = n_{cr} = \exp \int_0^{d > x_c} \bar{\alpha} dx$$

Atau,

$$\int_0^{d > x_c} \bar{\alpha} dx = \ln n_{cr} \approx 18,4 \quad (2-12)$$

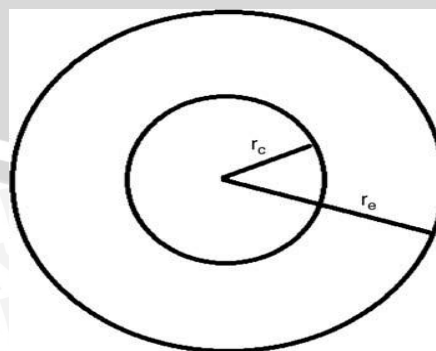
Dari persamaan diatas, tegangan tembus pada SF₆ dalam konfigurasi medan yang tidak seragam dapat diperkirakan secara teoritis.

2.11 Medan Dalam Silinder Konsentris

Untuk mengoptimalkan desain *busbar* yang terisolasi oleh gas, agar dapat memberikan kinerja yang maksimal dan memiliki usia guna panjang, maka sangat penting untuk mempelajari intensitas medan listrik pada teknik tegangan tinggi. Sebuah pendekatan yang sistematis, dengan bantuan teori medan listrik, dapat mengembangkan pemahaman yang jelas tentang perilaku dielektrik dalam berbagai kondisi medan.

Parameter yang menentukan besarnya tekanan listrik pada dielektrik dikenal sebagai "intensitas medan listrik". Performansi dari kekuatan dielektrik sangat tergantung pada konfigurasi medan dan besar intensitas medan. Muatan listrik dianggap statis ketika tidak ada gerakan dari muatan. Hal ini dimungkinkan hanya jika dielektrik tidak memiliki atau mengabaikan konduksi arus (Ravinda Arora & Wolfgang Mosch, 2011: 177).

Disain *busbar* yang terisolasi oleh gas SF₆ diibaratkan seperti silinder koaksial yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Penampang silinder koaksial

Sumber: Herman J. Kock, 2014:34

Gambar 2.9 tersebut digunakan sebagai dasar perancangan busbar yang berisolasi SF₆. Silinder ini mempunyai jari – jari berupa r_c dan r_e , dimana $r_c = r_1$ dan $r_e = r_2$.

Dengan:

$r_c = r_1$ adalah jari – jari konduktor,

$r_e = r_2$ adalah jari – jari penutup bagian dalam

Dengan mengambil permukaan gaus berbentuk silinder konsentris yang berjari – jari r dan menerapkan hukum gauss, maka: (Teguh Utomo & Moch. Dhofir, 2000: 7)

$$\int_s \vec{E} \cdot \vec{d}_{s1} = Q/\varepsilon \quad (2-13)$$

$$E2\pi r x = Q/\varepsilon$$

$$\vec{E} = \frac{Q}{2\varepsilon\pi r x} \vec{a}_r \quad (2-14)$$

Beda potensial antara konduktor dalam dan luar adalah:

$$U_{12} = U_1 - U_2 = - \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (2-15)$$

$$U_{12} = - \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon x} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2-16)$$

Dengan memasukkan persamaan (2-15) dan (2-16) diperoleh:

$$E = \frac{U}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2-17)$$

Dimana U adalah perbedaan potensial antara dua konduktor silinder konsentris.

Intensitas medan maksimum dari susunan ini adalah:

$$E_{max} = \frac{U}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2-18)$$

Bila tegangan yang menyebabkan susunan elektroda silinder konsentris menjadi tembus adalah U_d dan medan maksimumnya disebut E_d , maka:

$$U_d = E_d r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2-19)$$

Dari persamaan intensitas medan, maka susunan silinder konsentris memberikan distribusi medan yang tidak seragam. Untuk mengukur ketidak seragaman medan listrik ini digunakan parameter efisiensi medan yang didefinisikan sebagai:

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{mak}} \quad (2-20)$$

Atau

$$\eta = \frac{r_1}{r_2 - r_1} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2-21)$$

Efisiensi merupakan fungsi dari r_1 dan r_2 , dari persamaan diatas dapat dianalisis bahwa semakin besar rasio antara r_1 dan r_2 maka semakin kecil efisiensi dari medan, dengan demikian berarti semakin tidak merata besarnya medan listrik di dalam dielektrik. Tembus yang terjadi dalam suatu bahan isolasi terjadi bila medan rata – rata yang memberikan tekanan (*stress field*) minimal sama dengan kekuatan dielektrik bahan isolasi. Walaupun dalam bahan isolasi tekanan medan tidak rata, namun perlu diperhatikan pembesaran medan setempat yang biasanya justru melampaui besarnya kekuatan dielektrik bahan tersebut. Dengan demikian akan terjadi pelepasan sebagian (*partial discharge*) di tempat tertentu. Walaupun pelepasan sebagian ini tidak menimbulkan tembus total, namun dapat menjadi penyulut terjadinya tembus total (Teguh Utomo & Moch. Dhofir, 2000: 7).

2.12 Penentuan Dimensi Kabel Koaksial

Untuk menentukan dimensi suatu kabel, perlu diketahui kekuatan medan maksimum yang mungkin timbul. Tegangan tembus U_d dapat ditentukan dari hubungan dalam persamaan (2-22): (Teguh Utomo & Moch. Dhofir, 2000: 7)

$$U_d = E_d r_1 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2-22)$$

Apabila :

1. U_d sebagai fungsi dari r_1 atau r_2 bila $\left(\frac{r_2}{r_1} \right)$ konstan, maka:

$$\text{Bila } \frac{r_2}{r_1} = c_1$$

Atau,

$$r_2 = c_1 r_1$$

$$r_1 = r_2 / c_1$$

Sehingga tegangan tembus dapat dinyatakan sebagai hubungan linier

$$U_d = c_1 r_1$$

Atau

$$U_d = c_2 r_2$$

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk memperbesar tegangan tembus haruslah memperbesar r_1 . Namun dengan bertambahnya harga r_1 , maka r_2 juga akan bertambah yang berarti bahwa dimensi dari kabel juga akan bertambah besar. Dengan kata lain semakin besar r_1 maka semakin besar tegangan sistem yang boleh diterapkan.

2. U_d sebagai fungsi dari r_2 bila r_1 konstan, maka:

Bila r_1 konstan maka U_d akan berubah apabila r_2 berubah. Tegangan U_d naik hampir linier pada permulaan, namun untuk r_2 yang semakin besar mengakibatkan pertambahan U_d tidak proporsional dan menuju kepada harga kejenuhan.

3. U_d sebagai fungsi dari r_1 dengan r_2 konstan, maka:

$$U_d = E_d r_1 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) = E_d r_1 [\ln r_2 - \ln r_1] \quad (2-23)$$

Harga dari r_1 yang memberikan U_d maksimum dapat ditentukan bila:

$$\frac{dU_d}{dr_1} = 0 \quad (2-24)$$

atau

$$E_d \left[\ln r_2 - \left(\ln r_1 + r_1 \cdot \frac{1}{r_1} \right) \right] = 0$$

atau

$$\ln r_2 / r_1 = 1 \text{ atau}$$

$$r_2 = er_1 \quad (2-25)$$

Jadi ketika $r_2 = er_1$, harga maksimum dari U_d adalah:

$$U_{dmax} = E_d r_1 \quad (2-26)$$

Kondisi tersebut memberikan syarat optimasi medan, sebab dengan kombinasi r_1 dan r_2 seperti itu akan diperoleh U_d yang maksimum.

Dengan menggunakan rumus efisiensi medan untuk susunan koaksial, maka besarnya nilai efisiensi bila menggunakan optimasi medan adalah:

$$\eta = \frac{1}{e-1} \times 100\% = 58,2\%$$

2.13 Minimilasi Volume Isolasi

Karena optimasi tidak tergantung panjang kabel, maka minimalisasi volume dinyatakan sebagai minimalisasi dari luas penampang isolasi. Luas penampang isolasi adalah:

$$A = \pi(r_2^2 - r_1^2) = \pi r_1^2 \left[\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right] \quad (2-27)$$

Dari persamaan sebelumnya r_1 dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$r_1 = \frac{U_b}{E_b \ln \lambda} \quad \text{dimana } \lambda = \frac{r_2}{r_1} \quad (2-28)$$

Dengan demikian luas penampang isolasi menjadi:

$$A = \pi (U_b^2 / E_b^2) (\lambda^2 - 1 / \ln^2 \lambda)$$

Syarat A (Luas penampang isolasi) minimum apabila:

$$\frac{dA}{d\lambda} = 0 \quad (2-29)$$

Atau

$$2\lambda^2 \ln^2 \lambda - (\lambda^2 - 1) \cdot 2 \ln \lambda = 0$$

$$\lambda^2 \ln \lambda - (\lambda^2 - 1) = 0$$

$$\lambda^2 \ln \lambda - \lambda^2 + 1 = 0$$

Sehingga $\lambda = 2,23$

$$\frac{r_2}{r_1} = 2,23 \quad (2-30)$$

Rasio diatas membirikan volume bahan isolasi minimum, yaitu:

$$A_{min} = \pi r_1^2 (2,23^2 - 1)$$

Bila U_b dan E_b tertentu maka r_1 dapat ditentukan dengan persamaan diatas, dan efisiensi medan dalam hal ini adalah 65, 2%.

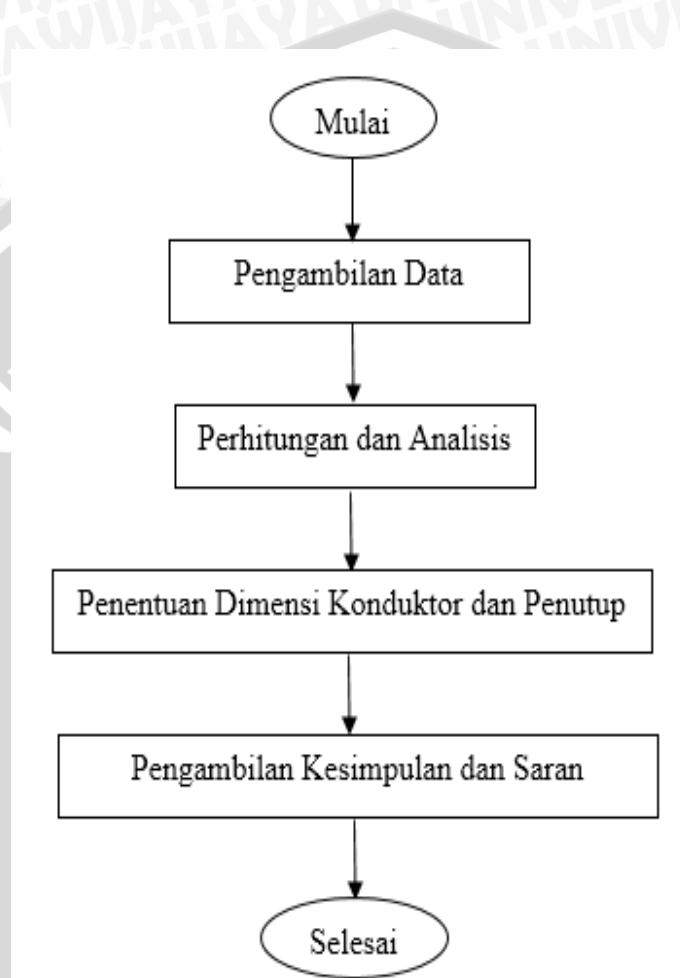
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB III

METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang metode yang digunakan untuk menentukan dimensi *busbar* yang dipengaruhi oleh isolasi gas SF₆. Metodologi yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir pelaksanaan penelitian

Sumber: Penulis

3.1 Pengambilan Data

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

- Single line diagram* dari *busbar* 150 kV yang berisolasi udara di gardu induk Sengkaling.
- Data daya transformator dan kapasitas *busbar* pada gardu induk Sengkaling yang terhubung pada *busbar*.

c. Data primer dan data sekunder yang meliputi dimensi *busbar* konvensional pada *switchyard*.

3.2 Perhitungan dan Analisis Penampang *Busbar*

Perhitungan dan analisis dimensi *busbar* yang menggunakan gas SF₆ didasarkan pada ketahanan *busbar* terhadap arus gangguan hubung singkat dan ketahanan terhadap tegangan tembus. Konfigurasi yang digunakan dalam perancangan ini berupa *busbar* satu fasa yang berada di dalam satu *enclosure* yang dapat di gambarkan seperti sebuah silinder koaksial.

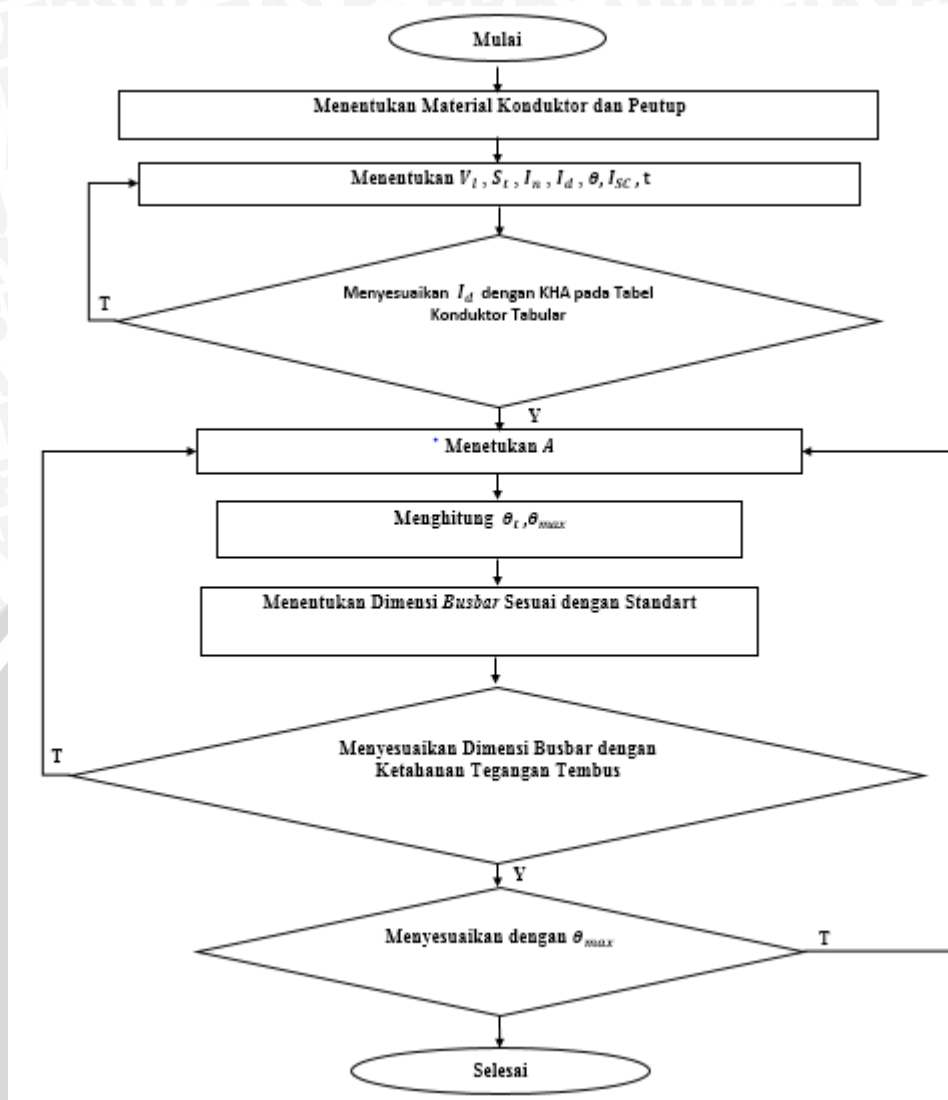
Perhitungan dilakukan dengan menggunakan beberapa persamaan yang terkait dengan penentuan dimensi *busbar* yang terisolasi gas SF₆. Dan analisis yang dilakukan adalah menyesuaikan hasil perhitungan yang telah dilakukan dengan standar dimensi *busbar* dan batas suhu maksimal yang diizinkan dalam perancangan *busbar* yang terisolasi oleh gas SF₆.

3.3 Penentuan Dimensi Konduktor dan Penutup

Penentuan dimensi konduktor dan penutup dapat dilihat pada diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3.

3.3.1 Penentuan Dimensi Konduktor

Penentuan dimensi konduktor *busbar* didasarkan pada ketahanan dimensi konduktor tersebut terhadap arus gangguan hubung singkat dan juga didasarkan pada ketahanan konduktor *busbar* tersebut terhadap tegangan tembus. Pemilihan dimensi *busbar* yang sesuai dapat dilakukan dengan cara yang ditunjukkan oleh Gambar 3.2.

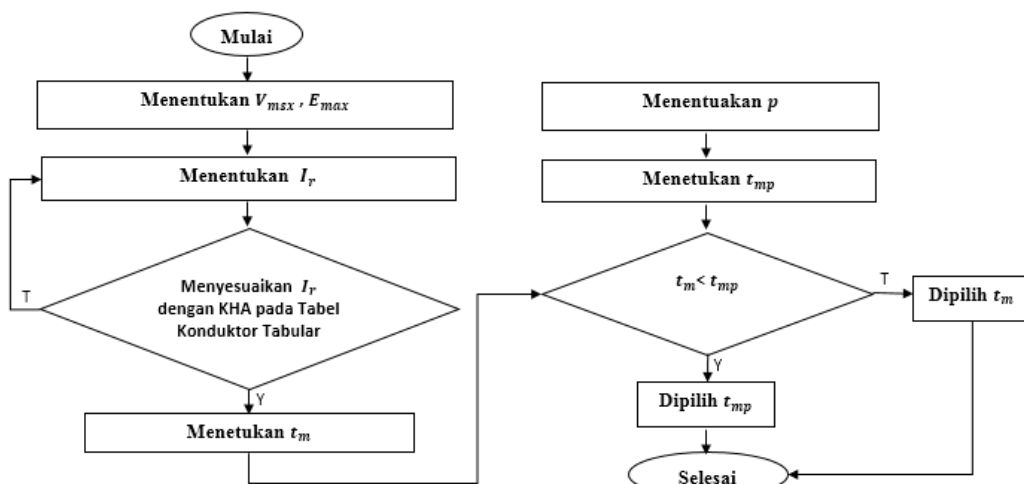


Gambar 3.2 Diagram alir perhitungan dimensi konduktor busbar

Sumber: Penulis

3.3.2 Penentuan Dimensi Penutup Konduktor

Perhitungan dan analisis yang dilaksanakan didasarkan atas arus balik yang mengalir pada konduktor penutup dan besarnya tekanan yang ditimbulkan oleh gas dari dalam, yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram alir perhitungan dimensi penutup

Sumber: Penulis

3.4 Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil penelitian tentang bagaimana pengaruh adanya isolasi gas SF₆ terhadap dimensi busbar pada gardu induk Sengkaling.

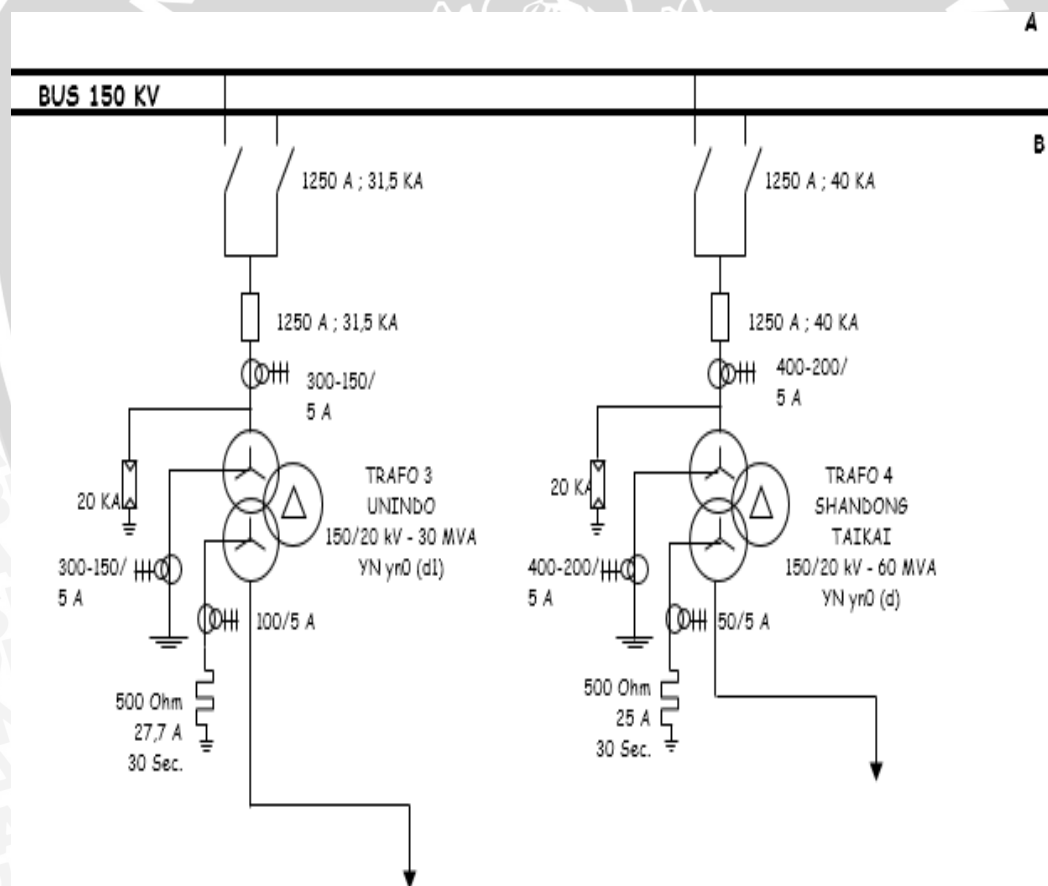
BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada Bab ini akan dibahas analisis perancangan dimensi dari busbar yang terisolasi oleh gas SF₆. Perancangan busbar ini merujuk pada busbar yang terisolasi oleh udara yang terletak pada gardu induk Sengkaling yang mempunyai kapasitas 150 kV. Pembahasan dalam Bab ini meliputi pengaruh gas SF₆ terhadap penentuan dimensi busbar.

4.1 Analisis Jari – Jari dan Material Busbar

Busbar Sengkaling merupakan busbar konvensional yang berada di wilayah Malang yang dipasang dari transformator yang mempunyai kapasitas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Single line diagram gardu induk Sengkaling
 Sumber: APP Malang 2013



Busbar konvensional tersebut akan dirubah menjadi *busbar* yang terisolasi oleh gas SF₆. Berdasarkan Gambar 4.1 telah diketahui bahwa kapasitas dari transformator yang menyuplai *busbar* adalah seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kapasitas transformator penyuplai *busbar* Sengkaling

No.	Nama trafo	Tegangan nominal	Daya nominal	Arus ketahanan hubung singkat DS & CB
1.	UNINDO	150/20 kV	30 MVA	31,5 kA
2.	SHANDONG	150/20 kV	60MVA	40 kA

Sumber: Analisis

Berdasarkan Tabel 4.1 telah diketahui bahwa tegangan nominal dari transformator yang menyuplai *busbar* adalah 150 kV. Untuk *busbar* yang mempunyai tegangan nominal (V_l) sebesar 150 kV maka menurut IEC 62067 *busbar* tersebut mempunyai tingkat tegangan tertinggi sebesar 170 kV. Dengan tegangan tertinggi 170 kV maka diambil pendekatan terhadap tegangan tertinggi 169 kV yang sesuai setandart ANSI/IEEE C37.38-1989 yang mempunyai:

Tegangan ketahanan impuls: 715 kV

Tegangan ketahanan frekuensi 50 Hz: 341 kV

4.2 Metode Analisis Jari – Jari Menggunakan KHA

Untuk menentukan dimesi *busbar* harus didasarkan pada kemampuan *busbar* tersebut menghantarkan arus yang sesuai dengan tegangan nominal (V_l) dan daya (S_t) dari transformator yang tersambung pada *busbar* tersebut.

Bila diketahui:

$$V_l = 150 \text{ kV}$$

$$S_t = S_{t1} + S_{t2}$$

$$S_t = 30 \text{ MVA} + 60 \text{ MVA} = 90 \text{ MVA}$$

Maka arus nominal (I_n) yang didapatkan berdasarkan persamaan 2-2 adalah:

$$I_n = \frac{S_t}{\sqrt{3} \times V_l}$$

$$I_n = \frac{90.10^6}{\sqrt{3} \times 150.10^3}$$

$$I_n = 346,4 \text{ A}$$

Sedangkan menurut PUIL 2000 Penghantar sirkit akhir yang menyuplai motor tunggal tidak boleh mempunyai KHA kurang dari 125 % arus pengenalan beban penuh, jadi arus disain penghantar dapat diselesaikan dengan merujuk pada persamaan 2-1 yang ditunjukkan pada perhitungan berikut:

$$I_d = 125\% \times I_n$$

$$I_d = 125\% \times 346,4 \text{ A}$$

$$I_d = 433 \text{ A}$$

Jadi dengan kapasitas transformator sebesar 90 MVA dan tegangan busbar 150 kV, maka didapatkan arus disain yang mengalir pada busbar adalah 433 A.

Nilai arus disain tersebut harus disesuaikan dengan kuat hantar arus (KHA) pada konduktor yang dipilih yaitu jenis tabular yang ditunjukkan dalam Tabel 2.4 dan Tabel 2.5. Dengan menggunakan data kuat hantar arus (KHA) konduktor yang menggunakan material tembaga dapat dipilih penampang konduktor yang sesuai, yaitu konduktor yang mampu mengalirkan arus sebesar 433 A secara terus menerus. Dari Tabel 2.4 penampang konduktor yang memenuhi ditunjukkan dengan arsiran berwarna biru yaitu konduktor dengan penampang yang memiliki diameter 20 mm, tebal 3 mm, dan luas penampang 160 mm² yang mempunyai kuat hantar arus sebesar 457 A.

Sedangkan kuat hantar arus konduktor yang menggunakan material aluminium ditunjukkan oleh Tabel 2.5. Dengan menggunakan data kuat hantar arus (KHA) konduktor yang menggunakan material aluminium dapat dipilih penampang konduktor yang sesuai, yaitu konduktor yang mampu mengalirkan arus sebesar 433 A secara terus menerus. Dari Tabel 2.5 penampang konduktor yang memenuhi ditunjukkan dengan arsiran berwarna biru yaitu konduktor dengan penampang yang memiliki diameter

20 mm, tebal 5 mm, dan luas penampang 236 mm² yang mempunyai kuat hantar arus sebesar 440 A.

Dari Tabel 2.4 dan Tabel 2.5 telah didapatkan nilai arus yang sesuai untuk digunakan sebagai dasar penentuan dimensi busbar yang terisolasi oleh gas SF₆. Dengan diketahuinya nilai arus tersebut maka parameter – parameter penyusun dimensi busbar yang terisolasi oleh gas SF₆ juga didapatkan, seperti yang ditunjukkan oleh arsiran biru yang terdapat pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5 yang akan ditunjukkan kembali oleh Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Arus dan luas penampang konduktor tabular terpilih berdasarkan KHA

D_1 (mm)	a (mm)	A (mm ²)	Material	KHA (A)
20	3	160	E-Cu F 37	457
20	5	236	E-Al F 10	440

Sumber: Hasil analisis

Dari Tabel 4.2 didapatkan nilai diameter konduktor sebesar 20 mm, ketebalan konduktor sebesar 3 mm, dan luas penampang konduktor sebesar 160 mm², yang dimiliki oleh material tembaga dengan kuat hantar arus sebesar 457 A. Dan apabila material aluminium yang digunakan maka dengan arus yang didapatkan sebesar 440 A, juga didapatkan nilai dari diameter konduktor sebesar 20 mm, ketebalan konduktor sebesar 5 mm, dan luas penampang konduktor sebesar 236 mm².

4.3 Metode Penentuan Jari – Jari Busbar Menggunakan Arus Hubung Singkat

Dalam penentuan dimensi konduktor busbar persyaratan yang juga harus dipenuhi adalah saat terjadi hubung singkat kenaikan temperatur konduktor harus sesuai dengan standar. Temperatur maksimal pada konduktor adalah 65 – 70 °C yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2, sedangkan menurut IEEE kenaikan temperatur maksimal yang diizinkan pada metal ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 menunjukkan batas temperatur maksimal dan kenaikan temperatur maksimal yang diizinkan pada switchgear yang memiliki sifat material yang berbeda. Pada baris ke 10 pada Tabel 2.2 ditunjukkan temperatur yang diizinkan pada bagian yang mengalirkan arus. Dan diketahui bahwa busbar merupakan konduktor yang mengalirkan arus juga. Dikarenakan hal tersebut maka temperatur maksimal pada konduktor busbar

yang terisolasi oleh gas SF₆ disesuaikan dengan standar pada baris ke 10 tersebut. Jadi temperatur operasi maksimal konduktor yang menggunakan material tembaga ataupun menggunakan material aluminium adalah 105 °C dan kenaikan temperatur maksimalnya adalah 65 °C.

Penentuan temperatur maksimal yang diizinkan juga dipengaruhi oleh pemilihan kelas isolasi, pembagian temperatur pada kelas – kelas isolasi ditunjukkan oleh Tabel 2.3. Apabila dipilih nilai dari temperatur operasi maksimal konduktor adalah 105 °C dan kenaikan temperatur maksimalnya adalah 65 °C, maka berdasarkan IEEE Std 1247-2005 ditunjukkan bahwa kelas isolasi yang digunakan adalah kelas A. Untuk temperatur kelas isolasi yang lainnya dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Setelah temperatur maksimal ditentukan selanjutnya yaitu penentuan nilai arus hubung singkat. Menurut Herman J Kock, besarnya arus hubung singkat yang terjadi pada rating tegangan 100 kV – 170 kV memiliki standar arus hubung singkat sebesar 25kA – 50kA yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Dari rentang arus tersebut ditentukan arus hubung singkat maksimal yaitu 40 kA, pemilihan arus hubung singkat tersebut dipengaruhi oleh arus hubung singkat yang telah ditunjukkan oleh Gambar 4.1.

Besarnya kenaikan suhu yang terjadi juga dipengaruhi lamanya waktu gangguan hubung singkat, dan telah diketahui bahwa waktu gangguan hubung singkat adalah 1 detik sampai 3 detik, maka dipilih waktu gangguan terpanjang yaitu selama 3 detik.

Setelah didapatkan arus hubung singkat, waktu gangguan, dan temperatur maksimal yang diizinkan selanjutnya yaitu menentukan luas penampang konduktor yang sesuai dan didasarkan pada persamaan (2-3) yang juga disesuaikan dengan temperatur maksimal yang diizinkan.

$$\theta_t = \frac{K}{100} \times \left(\frac{I_{sc}}{A} \right)^2 \times (1 + \alpha_{20} \cdot \theta) \times t$$

dengan diketahui:

$$\text{Luas penampang konduktor tembaga: } (A) = 160 \text{ mm}^2$$

$$\text{Koefisien resistansi temperatur tembaga murni pada suhu } 20 \text{ }^\circ\text{C} :$$

$$(\alpha_{20}) = 0,00393$$

Konstanta material tembaga: $(K)= 0,52$

Arus hubung singkat: $(I_{SC})= 40 \text{ kA}$

Batas suhu maksimal konduktor: $(\theta)= 70^{\circ}\text{C}$

Waktu terjadinya gangguan: $(t) = 3 \text{ detik}$

Dan luas penampang (A) sebesar 160 mm^2 didapatkan pada Tabel 4.2 dengan KHA sebesar 457 A.

Maka didapatkan:

$$\theta_t = \frac{0,52}{100} \times \left(\frac{40000}{160}\right)^2 \times (1 + 0,00393 \cdot 70) \times 3$$

$$\theta_t = 1243,223^{\circ}\text{C}$$

Dari hasil perhitung tersebut didapatkan kenaikan suhu θ_t pada konduktor yang berbahan tembaga dengan luas penampang 160 mm^2 adalah $1243,2233^{\circ}\text{C}$. Kenaikan suhu sebesar $1243,233^{\circ}\text{C}$ sangat jauh dari standar kenaikan suhu maksimal yang diizinkan yaitu 65°C .

Dengan cara yang sama untuk material aluminium dengan data sebagai berikut:

Luas penampang konduktor aluminium : $(A) = 236 \text{ mm}^2$

Koefisien resistansi temperatur aluminium murni pada suhu 20°C :

$$(\alpha_{20}) = 0,00403$$

Konstanta material tembaga : $(K)= 0,166$

Arus hubung singkat : $(I_{SC})= 40 \text{ kA}$

Batas suhu maksimal konduktor : $(\theta)= 70^{\circ}\text{C}$

Waktu terjadinya gangguan : $(t) = 3 \text{ detik}$

Dengan luas penampang (A) adalah 236 mm^2 yang didapatkan dari Tabel 4.3 dengan KHA sebesar 440 A.

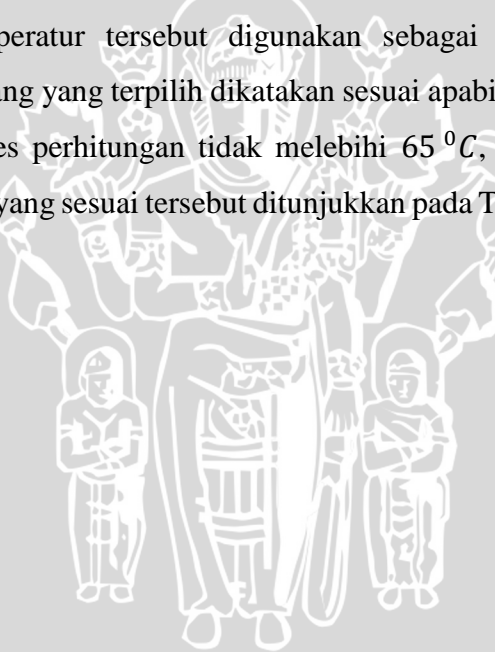
Maka didapatkan:

$$\theta_t = \frac{1,166}{100} x \left(\frac{40000}{236} \right)^2 x (1 + 0,00403.70) x 3$$

$$\theta_t = 1.288,361 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dari hasil perhitung tersebut didapatkan kenaikan suhu θ_t pada konduktor yang berbahan aluminium dengan luas penampang 236mm^2 adalah $1.288,361 \text{ } ^\circ\text{C}$. Kenaikan suhu sebesar $1.288,361 \text{ } ^\circ\text{C}$ sangat jauh dari standar kenaikan suhu maksimal yang diizinkan yaitu $65 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Perhitungan kenaikan temperatur (θ_t) tersebut juga berlaku untuk semua nilai penampang tembaga dan aluminium. Hasil dari perhitungan kenaikan temperatur pada semua luas penampang yang didasarkan pada persamaan 2-3 ditunjukkan pada Tabel 4.3. Nilai dari kenaikan temperatur tersebut digunakan sebagai dasar pemilihan luas penampang. Luas penampang yang terpilih dikatakan sesuai apabila kenaikan temperatur yang dihasilkan dari proses perhitungan tidak melebihi $65 \text{ } ^\circ\text{C}$, dengan kelas material isolasi A yang dipilih. Nilai yang sesuai tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.3 dengan arsiran berwarna kuning.



Tabel 4.3 Pengaruh luas penampang terhadap kenaikan temperatur pada konduktor

No.	A (mm ²)		θ_t (°C)		No.	A (mm ²)		θ_t (°C)	
	Cu	Al	Cu	Al		Cu	Al	Cu	Al
1	113	113	2492.481	5619.592	23	911	1070	38.34883	62.67497
2	160	160	1243.223	2802.991	24	1070	1380	27.79849	37.67936
3	201	201	787.7651	1776.109	25	1380	955	16.71209	78.6783
4	236	236	571.4323	1288.361	26	726	1180	60.38313	51.53445
5	264	264	456.6474	1029.565	27	955	1400	34.89652	36.6105
6	188	188	900.478	2030.233	28	1180	1810	22.85729	21.90305
7	273	273	427.0351	962.8007	29	1400	2200	16.23801	14.82574
8	352	352	256.8642	579.1304	30	1810	1210	9.714751	49.0107
9	424	424	177.0342	399.1443	31	914	1490	38.0975	32.32132
10	490	490	132.5552	298.8612	32	1210	1770	21.73793	22.9042
11	239	239	557.1768	1256.221	33	1490	2310	14.33561	13.44738
12	349	349	261.2991	589.1296	34	1770	1460	10.1588	33.66324
133	452	452	155.7801	351.2245	35	2310	1810	5.964374	21.90305
14	550	550	105.2116	237.2118	36	-	2150	-	15.52333
15	641	641	77.45916	174.6408	37	-	2820	-	9.02326
16	443	578	162.1741	214.786	38	-	3460	-	5.9939
17	578	707	95.26495	143.5565	39	-	1960	-	18.67882
18	707	829	63.67222	104.4125	40	-	2440	-	12.05264
19	829	1060	46.31053	63.86309	41	-	2900	-	8.532292
20	1060	1260	28.32547	45.19814	42	-	3820	-	4.917393
21	564	741	100.0531	130.6849	43	-	4710	-	3.234595
22	741	911	57.96321	86.46193					

Sumber: Hasil perhitungan

Hasil perhitungan pada Tabel 4.3 didapatkan dengan cara menetapkan temperatur maksimal yang mampu ditahan oleh konduktor yaitu sebesar 70 °C yang dijadikan sebagai suatu konstanta yang tetap. Dan selanjutnya yang dilakukan adalah merubah parameter luas penampang agar didapatkan nilai kenaikan temperatur yang sesuai dengan standar yang telah ditentukan yaitu tidak boleh melebihi 65 °C.

Penentuan dimensi *busbar* juga harus disesuaikan dengan standar temperatur maksimal pengoperasian konduktor saat terjadi kegagalan yaitu 105 °C apabila temperatur lingkungan yang ditentukan sebesar 40 °C . Jadi temperatur pengoperasian konduktor harus kurang atau sama dengan 105 °C yang dihasilkan dari penjumlahan antara kenaikan temperatur konduktor dengan suhu lingkungan di sekitar konduktor. Dengan cara yang sama pula untuk semua luas penampang konduktor didapatkan. Hasil analisis perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Luas penampang dan temperatur saat terjadi kegagalan pada konduktor tabular tembaga

No.	Material tembaga dengan suhu lingkungan 40°C			No.	Material tembaga dengan suhu lingkungan 40°C		
	A (mm ²)	θ_t (°C)	θ_{max} (°C)		A (mm ²)	θ_t (°C)	θ_{max} (°C)
1	113	2492.481	2532.481	19	829	46.31053	86.31053
2	160	1243.223	1283.223	20	1060	28.32547	68.32547
3	201	787.7651	827.7651	21	564	100.0531	140.0531
4	236	571.4323	611.4323	22	741	57.96321	97.96321
5	264	456.6474	496.6474	23	911	38.34883	78.34883
6	188	900.478	940.478	24	1070	27.79849	67.79849
7	273	427.0351	467.0351	25	1380	16.71209	56.71209
8	352	256.8642	296.8642	26	726	60.38313	100.3831
9	424	177.0342	217.0342	27	955	34.89652	74.89652
10	490	132.5552	172.5552	28	1180	22.85729	62.85729
11	239	557.1768	597.1768	29	1400	16.23801	56.23801
12	349	261.2991	301.2991	30	1810	9.714751	49.71475
13	452	155.7801	195.7801	31	914	38.0975	78.0975
14	550	105.2116	145.2116	32	1210	21.73793	61.73793
15	641	77.45916	117.4592	33	1490	14.33561	54.33561
16	443	162.1741	202.1741	34	1770	10.1588	50.1588
17	578	95.26495	135.265	35	2310	5.964374	45.96437
18	707	63.67222	103.6722				

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.4 menunjukkan adanya pengaruh luas penampang terhadap perubahan temperatur pada konduktor tembaga, dari Tabel 4.4 tersebut juga ditunjukkan bahwa luas penampang terkecil yang mampu memenuhi standar temperatur adalah penampang konduktor dengan luas 707 mm². Sedangkan untuk konduktor yang menggunakan material aluminium dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Luas penampang dan temperatur saat terjadi kegagalan pada konduktor tabular aluminium

No.	Material aluminium dengan suhu lingkungan 40°C			No.	Material aluminium dengan suhu lingkungan 40°C		
	A (mm ²)	θ_t (°C)	θ_{max} (°C)		A (mm ²)	θ_t (°C)	θ_{max} (°C)
1	113	5619.592	5659.592	23	1070	62.67497	102.675
2	160	2802.991	2842.991	24	1380	37.67936	77.67936
3	201	1776.109	1816.109	25	955	78.6783	118.6783
4	236	1288.361	1328.361	26	1180	51.53445	91.53445
5	264	1029.565	1069.565	27	1400	36.6105	76.6105
6	188	2030.233	2070.233	28	1810	21.90305	61.90305
7	273	962.8007	1002.801	29	2200	14.82574	54.82574
8	352	579.1304	619.1304	30	1210	49.0107	89.0107
9	424	399.1443	439.1443	31	1490	32.32132	72.32132
10	490	298.8612	338.8612	32	1770	22.9042	62.9042
11	239	1256.221	1296.221	33	2310	13.44738	53.44738
12	349	589.1296	629.1296	34	1460	33.66324	73.66324
13	452	351.2245	391.2245	35	1810	21.90305	61.90305
14	550	237.2118	277.2118	36	2150	15.52333	55.52333
15	641	174.6408	214.6408	37	2820	9.02326	49.02326
16	578	214.786	254.786	38	3460	5.9939	45.9939
17	707	143.5565	183.5565	39	1960	18.67882	58.67882
18	829	104.4125	144.4125	40	2440	12.05264	52.05264
19	1060	63.8631	103.8631	41	2900	8.532292	48.53229
20	1260	45.19814	85.19814	42	3820	4.917393	44.91739
21	741	130.6849	170.6849	43	4710	3.234595	43.23459
22	911	86.46193	126.4619				

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.5 menunjukkan adanya pengaruh luas penampang terhadap perubahan temperatur pada konduktor aluminium, dari Tabel 4.5 tersebut juga ditunjukkan bahwa luas penampang terkecil yang mampu memenuhi standar temperatur adalah penampang konduktor dengan luas 1060 mm².

Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukkan bahwa luas penampang konduktor mempengaruhi temperatur operasi maksimal saat terjadi kegagalan yang disebabkan arus hubung singkat. Berdasarkan Tabel tersebut dapat kita tarik kesimpulan bahwa dengan semakin besarnya luas penampang konduktor maka temperatur operasi konduktor tersebut akan semakin kecil. Jadi apabila luas penampang konduktor semakin besar maka konduktor tersebut memiliki kemampuan yang lebih besar untuk menahan panas yang

dihasilkan dari arus hubung singkat yang terjadi apabila dibandingkan dengan luas penampang konduktor yang lebih kecil.

Dari Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 telah didapatkan luas penampang konduktor yang memenuhi persamaan (2-3), sedangkan untuk penampang sebesar 160 mm^2 tidak diarsir dengan warna kuning, hal tersebut dikarenakan untuk nilai luas penampang konduktor sebesar 160 mm^2 yang dihasilkan dari perhitungan arus nominal menggunakan material tembaga didapatkan hasil kenaikan temperatur sebesar $1243,223 \text{ }^\circ\text{C}$, dan untuk material aluminium dengan luas penampang 236 mm^2 dihasilkan kenaikan temperatur sebesar $1288,361 \text{ }^\circ\text{C}$. Kenaikan temperatur yang dihasilkan dari perhitungan kedua luas penampang tersebut sangat jauh melebihi batas standar yang ditetapkan. Maka luas penampang yang memiliki besar 160 mm^2 dan 236 mm^2 tidak layak digunakan karena tidak sesuai dengan standar temperatur maksimal.

Untuk memperjelas hasil perhitungan yang didapatkan maka nilai – nilai yang terdapat pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 dengan arsiran berwarna kuning dapat dikerucutkan lagi menjadi nilai – nilai yang lebih sesuai untuk digunakan sebagai dimensi busbar yang terisolasi gas SF₆. Dengan menggunakan luas penampang sebagai parameter utamanya, maka luas penampang yang dipilih adalah penampang yang memiliki luas paling kecil diantara luas penampang yang sudah memenuhi standar temperatur. Nilai - nilai yang dipilih dan dimensinya yang didasarkan pada standar temperatur akan ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Dimensi konduktor tabular berdasarkan standar temperatur

$D_1(\text{mm})$	$a(\text{mm})$	$A(\text{mm}^2)$	Material	$KHA(A)$	$\theta_t(^\circ\text{C})$	$\theta_{max}(^\circ\text{C})$
50	5	707	E-Cu F 30	1410	63.67222	103.6722
50	8	1060	E-Al F 10	1370	63.8631	103.8631

Sumber: Hasil analisis dan perhitungan

Tabel 4.6 menunjukkan bahwa dengan luas penampang yang dimiliki oleh material tembaga adalah 707 mm^2 didapatkan diameter konduktor bagian luar sebesar 50 mm , ketebalan konduktor sebesar 5 mm , dan kuat hantar arus konduktor 1410 A . Apabila menggunakan material aluminium maka didapatkan luas penampang sebesar 1060 mm^2 , didapatkan diameter konduktor bagian luar sebesar 50 mm , ketebalan konduktor sebesar 8 mm , dan kuat hantar arus konduktor sebesar 1370 A .

4.4 Penentuan Dimensi Busbar Menggunakan Ketahanan Tegangan Tembus

Selanjutnya penentuan dimensi busbar juga harus didasarkan pada kemampuan busbar tersebut untuk menahan tegangan breakdown maksimal yang terjadi. Penentuan dimensi ini didasarkan pada persamaan 2-24 yang menjelaskan bahwa nilai jari - jari konduktor (r_1) minimal yang mampu menahan tegangan breakdown tertinggi didapatkan apabila $\frac{dU_d}{dr_1} = 0$, dengan persyaratan tersebut akan menghasilkan syarat baru yaitu $\ln \frac{r_2}{r_1} = 1$, jadi dengan menyisipkan syarat tersebut pada persamaan 2-22 berikut:

$$U_d = r_1 E_d \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$U_d = r_1 E_d \cdot 1$$

Persamaan 2-22 tersebut mencakup kedua jenis material baik material tembaga maupun aluminium, maka didapatkan nilai r_1 sebagai berikut:

$$r_1 = U_d / E_d,$$

Dengan:

E_d : Kekuatan medan maksimal yang dimiliki oleh isolasi gas SF₆ yang mempunyai nilai sebesar $89 \frac{kV}{cm}$, nilai tersebut didapatkan dari hasil persamaan 2-9.

U_d : adalah tegangan breakdown tertinggi yang mampu ditahan yang mempunyai nilai sebesar 341 kV, nilai U_d ini didapatkan dari nilai low frequency withstand voltage sebesar 341 kV karena syarat penentuan jari – jari pada busbar yang berisolasi gas SF₆ adalah dimensi tersebut harus mampu menahan low frequency withstand voltage. Hal tersebut dikarenakan M.S Naidu mengatakan bahwa tegangan yang digunakan untuk merancang dimensi busbar pada GIS merupakan tegangan frequency withstand.

Dengan diketahuinya nilai – nilai dari U_d dan E_d , maka jari - jari konduktor minimal dari material tembaga dan material aluminium adalah:

$$r_1 = U_d / E_d$$

$$r_1 = 341 / 89$$

$$r_1 = 3,83 \text{ cm}$$

Nilai jari - jari konduktor minimal yang didapatkan dari perhitungan tegangan *breakdown* adalah sebesar 3,83 *cm*, nilai jari – jari konduktor tersebut harus disesuaikan dengan standar yang ditunjukkan pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5, dan juga harus disesuaikan dengan standar temperatur yang diizinkan. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, jari - jari konduktor dengan nilai 3,83 *cm* tidak ada pada standar, oleh karena itu kita pilih jari – jari konduktor yang mendekati nilai perhitungan dan sesuai dengan standar yaitu 4 *cm* yang didapatkan dari diameter standar sebesar 80 *mm*.

Jadi untuk kedua material baik material tembaga maupun material aluminium mempunyai syarat jari - jari konduktor sebesar 4 *cm*. Dengan dipilihnya jari - jari konduktor 4 *cm*, maka luas penampang yang dipilih adalah penampang yang memiliki luas terkecil yang telah memenuhi persyaratan standar temperatur yaitu 726 *mm*² untuk material tembaga dan 1180 *mm*² untuk material aluminium.

Dengan didapatkannya nilai dari luas penampang konduktor maka dimensi konduktor yang lainnya juga bisa didapatkan. Dimensi konduktor yang dipilih akan ditunjukkan kembali pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Dimensi konduktor tabular berdasarkan tegangan *breakdown*

D_1 (mm)	a (mm)	A (mm ²)	Material	KHA (A)
80	3	726	E-Cu F 30	1750
80	5	1180	E-Al F 10	1770

Sumber: Hasil perhitungan dan analisis

Tabel 4.7 menunjukkan bahwa dengan luas penampang yang dimiliki oleh material tembaga adalah 726 *mm*² didapatkan diameter konduktor 80 *mm*, ketebalan konduktor sebesar 3 *mm*, dan kuat hantar arus konduktor 1750 *A*. Apabila menggunakan material aluminium yang memiliki luas penampang sebesar 1180 *mm*² didapatkan diameter konduktor sebesar 80 *mm*, ketebalan konduktor sebesar 5 *mm*, dan kuat hantar arus konduktor sebesar 1770 *A*.

Jadi dengan didapatkannya jari – jari konduktor minimal (r_1) adalah 4 *cm*, maka akan didapatkan nilai – nilai yang lainnya yang didasarkan pada persamaan (2-22), nilai – nilai yang ingin didapatkan akan diperoleh berdasarkan perhitungan berikut:

$$U_d = r_1 E_d \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Dengan diketahui besarnya nilai dari:

$$E_d = 89 \frac{kV}{cm},$$

$$U_d = 341 kV$$

$$D_1 = 80 mm = 8 cm,$$

$$r_1 = \frac{D_1}{2} = 4 cm$$

Maka jari – jari penutup bagian dalam (r_2) dapat diketahui dengan memasukkan nilai – nilai diatas dengan penyelesaian persamaan yang ditunjukkan sebagai berikut:

$$341 = 4 \times 89 \times \ln \frac{r_2}{4}$$

$$\ln \frac{r_2}{4} = 0,958$$

$$r_2 = 4 \times e^{0,958} = 10,43 cm$$

$$D_2 = 20,86 cm$$

Dari penyelesaian diatas telah didapatkan diameter penutup bagian dalam busbar (D_2) adalah 20,86 cm, namun nilai dari diameter penutup bagian dalam tersebut belum *fix* untuk digunakan. Hal tersebut dikarenakan penentuan dimensi tersebut juga harus merujuk pada gradien tegangan yang diizinkan dimana gradien tegangan ini membatasi nilai diameter minimal yang diizinkan, apabila ditentukan gradien tegangan yang diizinkan adalah 3 kV/mm maka berdasarkan persamaan (2-4) didapatkan:

$$E_s = 2,2 \frac{V}{D}$$

$$\frac{3kV}{mm} = 2,2 \times 150 \frac{kV}{D}$$

$$D = 109,5 mm$$

$$D = 10,95 cm$$

Dari persamaan diatas didapatkan nilai D sebesar $10,95 \text{ cm}$, dengan D merupakan diameter minimal penutup bagian dalam yang diizinkan.

Dari perhitungan sebelumnya didapatkan nilai diameter penutup bagian dalam (D_2) sebesar $20,86 \text{ cm}$, dari nilai tersebut dapat kita bandingkan dengan besarnya nilai diameter penutup bagian dalam minimal yang diizinkan (D) sebesar $10,95 \text{ cm}$. Dari kedua nilai tersebut dapat kita simpulkan bahwa (D_2) memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan (D), hal tersebut menunjukkan bahwa nilai diameter penutup bagian dalam (D_2) sebesar $20,26 \text{ cm}$ layak untuk digunakan.

Apabila penentuan dimensi didasarkan pada persamaan (2-22) maka kedua dimensi dari material yang berbeda ini dapat diselesaikan dengan cara yang sama dan mempunyai hasil yang sama. Maka penentuan dimensi dapat dilakukan hanya sekali saja, karena nilai yang dihasilkan dapat mewakili disain dari kedua material yang berbeda tersebut.

Nilai yang telah didapatkan selanjutnya disesuaikan dengan standar penentuan dimensi yang sebelumnya. Dikarenakan parameter jari – jari konduktor minimal sudah didapatkan maka nilai luas penampang konduktor dan nilai lainnya juga didapatkan. Nilai dari luas penampang yang didapatkan kemudian dicocokkan dengan standar temperatur maksimal yang diizinkan. Nilai yang sesuai dengan standar dan sesuai dengan persamaan 2-22 kemudian dipilih dan ditunjukkan kembali pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Dimensi *busbar* yang diperoleh dari ketahanan *breakdown* dan standar temperatur

$D_1(mm)$	$a(mm)$	$r_1(mm)$	$r_2(mm)$	$D_2(mm)$	$A(mm^2)$	Material	$KHA(A)$
80	3	40	10,43	20,86	726	E-Cu F 30	1750
80	5	40	10,43	20,86	1180	E-Al F 10	1770

Sumber: Hasil analisis dan perhitungan

Dengan nilai $r_1 = 4 \text{ cm}$ dan $r_2 = 10,43 \text{ cm}$, maka akan didapatkan nilai-nilai sebagai berikut:

$$\text{Luas penampang isolasi } (A) = \pi(10,43^2 - 4^2) = 291,5 \text{ cm}^2$$

Efisiensi medan dalam keadaan ini sebesar:

$$\eta = \frac{1}{\frac{r_2}{r_1} - 1} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \frac{1}{\frac{10,43}{4} - 1} \ln \left(\frac{10,43}{4} \right) \times 100\% = 59,62\%$$

Dengan cara yang sama analisis perhitungan menggunakan material lainnya juga dapat ditentukan, dikarenakan jari – jari konduktor material aluminium dan material tembaga sama maka dimensi penyusunnya juga sama yang membedakan adalah ketebalan konduktor, luas penampang konduktor dan kuat hantar arus dari *busbar* tersebut.

Apabila digunakan optimasi medan maka akan didapatkan nilai – nilai yang sesuai yang didasarkan pada persamaan (2-25) sebagai berikut:

$$r_2 = e r_1, \text{ syarat optimasi medan}$$

Jadi dengan didapatkannya jari – jari konduktor (r_1) minimal adalah 4 cm, maka jari – jari penutup bagian dalam (r_2) dapat diketahui dengan memasukkan nilai – nilai yang ditunjukkan dengan perhitungan berikut ini:

$$r_2 = 2,718 \times 4 = 10,87 \text{ cm}$$

$D_{2\text{optimasi}} = 10,87 \times 2 = 21,74$, $D_{2\text{optimasi}}$ sesuai dengan standar gradien tegangan

$$\text{Luas penampang isolasi (A)} = \pi(10,87^2 - 4^2) = 321 \text{ cm}^2$$

Efisiensi medan dalam keadaan ini sebesar:

$$\eta = \frac{1}{\frac{r_2}{r_1} - 1} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \frac{1}{\frac{10,87}{4} - 1} \ln \left(\frac{10,87}{4} \right) \times 100\% = 58\%$$

Apabila digunakan minimalisasi volume maka akan didapatkan nilai yang sesuai dengan persamaan (2-30) sebagai berikut:

$$\frac{r_2}{r_1} = 2,23$$

$r_2 = r_1 \times 2,23$, dengan r_1 yang sudah didapatkan dari hasil perhitungan dan analisis sebesar 4 cm

$$r_2 = 4 \times 2,23 = 8,92 \text{ cm}$$

$D_{2\text{minimalisasi volume}} = 8,92 \times 2 = 17,84$, $D_{2\text{minimalisasi volume}}$ sesuai dengan standar gradien tegangan

$$\text{Luas penampang isolasi (A)} = \pi(8,92^2 - 4^2) = 199,7 \text{ cm}^2$$

Efisiensi medan dalam keadaan ini sebesar:

$$\eta = \frac{1}{\frac{r_2}{r_1} - 1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \times 100\%$$

$$\eta = \frac{1}{\frac{8,92}{4} - 1} \ln\left(\frac{8,92}{4}\right) \times 100\%$$

$$\eta = 65,2\%$$

Dari perhitungan diatas didapatkan berbagai macam dimensi yang berbeda. Dari berbagai macam dimensi tersebut kemudian dicari dimensi yang cocok untuk digunakan.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan dimensi busbar terhadap besarnya tegangan tembus yang mampu ditahan oleh dimensi busbar dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan 4.3 yang dihasilkan berdasarkan persamaan (2-22):

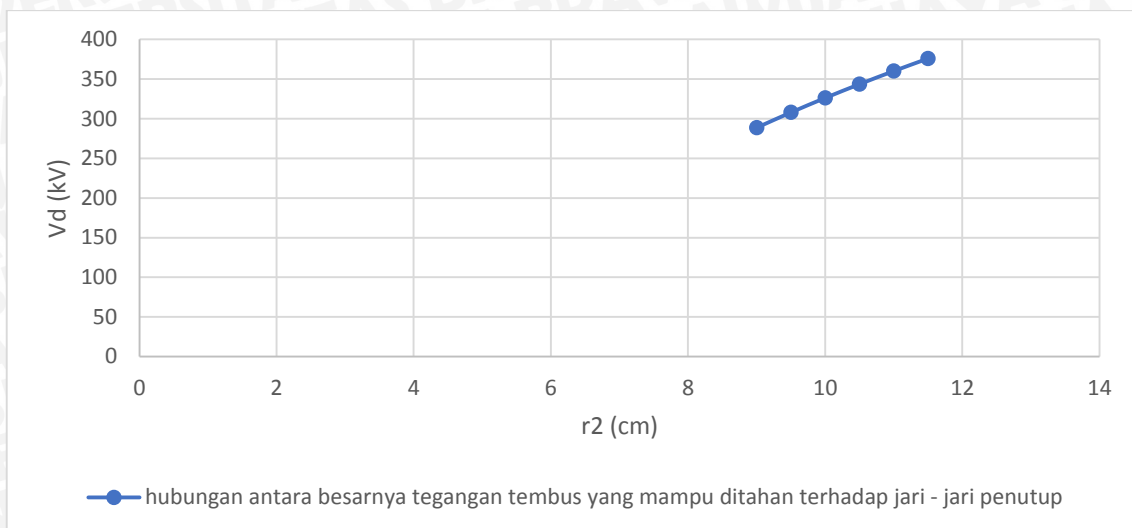
$$Vd = r_1 E_{max} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Dengan ditetapkan nilai dari $E_{max} = 89 \frac{kV}{cm}$, $r_1 = 4 \text{ cm}$, dan nilai r_2 berubah – ubah yang dimulai dari nilai 9 cm dengan perubahan kenaikan $0,5 \text{ cm}$ dapat diselesaikan berdasarkan perhitungan berikut:

$$Vd = 4 \times 89 \times \ln\left(\frac{9}{4}\right)$$

$$Vd = 288,69 \text{ kV}$$

Perhitungan tersebut juga berlaku untuk perubahan dimensi yang lainnya. Perubahan nilai dari tegangan tembus yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3.



Gambar 4.2 Hubungan antara r_2 terhadap V_d dengan membuat r_1 bernilai konstan
 Sumber: Perhitungan

Berdasarkan Gambar 4.2 telah ditunjukkan perubahan nilai tegangan tembus yang dipengaruhi oleh perubahan dimensi busbar, dan dapat ditarik suatu kesimpulan yaitu apabila nilai jari – jari penutup diperbesar dengan membuat nilai dari jari – jari konduktor konstan maka akan didapatkan nilai dari tegangan tembus yang yang mampu ditahan oleh dimensi busbar tersebut akan menjadi semakin besar . Sedangkan untuk pengaruh dari perubahan jari –jari konduktor terhadap tegangan tembus yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hubungan antara r_1 terhadap V_d dengan membuat r_2 bernilai konstan
 Sumber: Perhitungan



Berdasarkan Gambar 4.3 dapat kita lihat bahwa ada pengaruh antara perubahan jari – jari konduktor terhadap perubahan nilai tegangan tembus yang terjadi dengan membuat nilai dari dimensi jari – jari penutup konstan. Pada Gambar 4.3 tersebut menunjukkan bahwa apabila nilai dari jari – jari konduktor diperbesar maka nilai dari tegangan tembus yang mampu ditahan akan semakin besar hingga bertemu suatu titik yang menghasilkan nilai tegangan tembus yang maksimal, maka apabila jari – jari konduktor tersebut terus diperbesar lagi dengan jari – jari penutup yang konstan mengakibatkan nilai dari tegangan tembus tersebut menjadi kecil, hal tersebut dikarenakan jarak pemisah antara konduktor *busbar* dan penutup menjadi semakin kecil.

Apabila dalam perancangan *busbar* yang diisolasi oleh gas SF₆ ditentukan $r_1 = 4$ dan $r_2 = 10,43$ cm, dimana nilai tersebut didapatkan dari hasil perhitungan dan analisis penentuan perancangan dimensi *busbar*, maka tegangan tembus yang terjadi adalah seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2-22).

$$Vd = r_1 E_{max} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$Vd = 4 \times 89 \times 0,958$$

$$Vd = 341 \text{ kV}$$

Persamaan tersebut digunakan untuk mengetahui kemampuan dari *busbar* dengan dimensi yang dimilikinya untuk dapat menahan tegangan tembus yang terjadi. Persamaan tersebut juga berlaku untuk jari – jari yang lainnya, dan hasil dari perhitungan jari – jari yang lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hubungan antara dimensi dan tegangan tembus yang terjadi

No.	r_1 (cm)	r_2 (cm)	V_d (kV)	η (%)	A isolasi (mm^2)
1	4	10,43	341	59,62	291,5
2	4	10,87	355,9	58	321
3	4	8,92	285,5	65,2	199,7

Sumber: Hasil perhitungan

Dari Tabel 4.9 dapat dilihat berbagai dimensi yang mempengaruhi tegangan *breakdown* yang terjadi. Dari hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa dimensi *busbar* pada nomer tiga yang memiliki jari – jari konduktor bagian dalam (r_1) sebesar 4 cm dan jari – jari penutup sebesar 8,92 cm tidak bisa digunakan karena tidak memenuhi syarat penentuan dimensi yaitu harus mampu menahan *power frequency whitstand voltage*

sebesar 341 kV. Dan yang memenuhi persyaratan tersebut adalah dimensi yang ditunjukkan oleh nomer 1 dan 2. Diantara kedua dimensi tersebut dipilih yang nomer 2 karena dimensi tersebut mempunyai ketahanan tegangan *breakdown* lebih besar dari pada yang nomer satu.

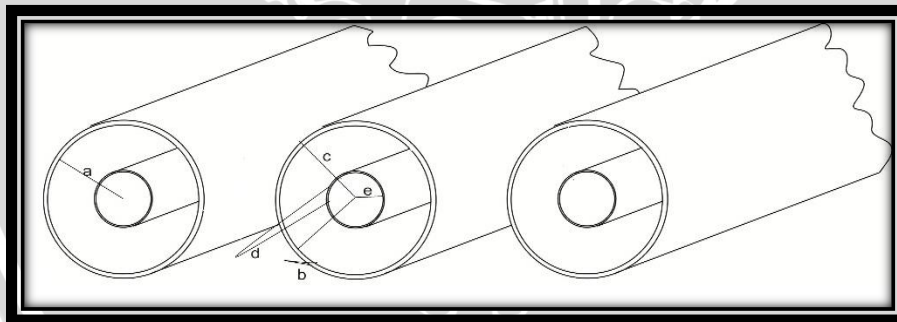
Jadi dengan material yang berbeda didapatkan dimensi yang sama yaitu jari – jari konduktor bagian luar adalah 4 cm, jari – jari penutup bagian dalam adalah 10,87 cm, dan yang membedakan adalah luas penampang konduktor, ketebalan konduktor dan kuat hantar arus konduktor yang akan ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hubungan antara Diamater konduktor bagian dalam terhadap dimensi busbar yang terisolasi oleh gas SF₆

D_1 (mm)	a (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)	D_2 (mm)	A (mm ²)	Material	KHA (A)
80	3	40	108,7	217,4	726	E-Cu F 30	1750
80	5	40	108,7	217,4	1180	E-Al F 10	1770

Sumber: Hasil analisis dan perhitungan

Tabel 4.10 menunjukkan nilai – nilai yang digunakan untuk disain dimensi busbar yang terisolasi oleh gas SF₆, dan Gambar busbar yang terisolasi oleh gas SF₆ ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Gambar penampang busbar yang terisolasi gas SF₆ 150 kV

Sumber: Penulis

Keterangan Gambar 4.4:

- a : Jari – jari penutup.
- b : Ketebalan penutup.
- c : Jari – jari total busbar.
- d : Ketebalan konduktor.
- e : Jari – jari konduktor.

Dari perhitungan dan analisis yang sudah dilakukan dapat diketahui bahwa dimensi *busbar* yang terisolasi gas SF₆ membutuhkan lahan yang lebih kecil dibandingkan dengan *busbar* yang menggunakan isolasi udara. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa kebutuhan lahan yang sedikit pada *busbar* yang menggunakan isolasi gas SF₆ tersebut dikarenakan jarak antara fasa *busbar* terhadap fasa *busbar* yang lainnya hanya membutuhkan jarak yang berukuran 0,6 meter sedangkan untuk *busbar* yang menggunakan isolasi udara membutuhkan jarak antar fasa yang lebih panjang yaitu 2,5 meter. Perbedaan nilai jarak antar fasa *busbar* tersebut dikarenakan kekuatan dielektrik kedua media isolasi memiliki nilai yang berbeda yaitu apabila menggunakan gas SF₆ memiliki kekuatan dielektrik sebesar 89 kV/cm dan apabila menggunakan udara memiliki kekuatan dielektrik 30 kV/cm.

Jadi apabila digunakan gas SF₆ sebagai media isolasi maka penggunaan gas tersebut akan memberikan keuntungan dalam hal kebutuhan lahan. Tetapi penggunaan gas SF₆ tersebut ternyata memiliki kekurangan saat pemeliharaan (*maintenance*) yaitu sulitnya proses pembuangan limbah gas SF₆.

Sulitnya pembuangan limbah gas SF₆ disebabkan karena gas SF₆ memiliki kemampuan untuk menyerap panas yang lebih besar dibandingkan dengan gas yang lain. Sehingga gas SF₆ digolongkan sebagai gas rumah kaca yang memberikan kontribusi terhadap pemanasan global. Walaupun gas SF₆ tidak memiliki jumlah yang banyak pada atmosfer udara apabila dibandingkan dengan gas rumah kaca yang lain seperti CO₂, akan tetapi keberadaan gas SF₆ yang memiliki berat 1 kg akan sebanding dengan gas CO₂ yang memiliki berat 23.900 kg. Jadi keberadaan gas SF₆ yang sedikit saja pada atmosfer udara dapat memberikan dampak yang besar terhadap pemanasan global. Oleh karena itu penggunaan *busbar* yang terisolasi oleh gas SF₆ membutuhkan pemeliharaan yang lebih terhadap pembuangan limbah gas yang dihasilkan.

4.5 Analisis Tekanan Busbar

Setelah didapatkan nilai dari dimensi *busbar* yang diisolasi oleh gas SF₆ maka yang perlu ditentukan adalah tekanan gas SF₆ yang berada di dalam tabung. Penentuan tekanan gas didalam tabung erat kaitannya dengan kuat medan maksimal yang mampu ditahan oleh isolasi gas SF₆, dan gas SF₆ harus mampu menahan kuat medan tertinggi yang terjadi saat gangguan. Untuk tegangan dengan tingkat tegangan dibawah 362 kV

maka tingkat tegangan tertinggi yang harus bisa ditahan adalah tegangan ketahanan impuls.

Dengan ditentukannya tegangan operasi sistem pada *busbar* yang dirancang adalah 150 *kV*, maka tegangan tersebut memiliki tegangan tertinggi, tegangan tahanan frekuensi 50 Hz, dan tegangan tahanan impuls yang telah ditentukan didalam standar. Dengan berbagai nilai tegangan tersebut, maka dapat ditentukan seberapa besar kuat medan dielektrik dari gas SF₆. Dengan merujuk pada persamaan (2-26) berikut:

$$E_d = U_{dmax}/r_1$$

Maka kuat medan maksimal yang ditimbulkan oleh tegangan tertinggi adalah:

$$E_d = U_{dmax}/r_1$$

$$E_d = \frac{150}{4} \text{ kV/cm}$$

$$E_d = 37,5 \text{ kV/cm}$$

Jadi kuat medan maksimal yang didapatkan dari hasil perhitungan tegangan tertinggi adalah 37,5 *kV/cm*. Perhitungan yang merujuk pada persamaan (2-26) tersebut juga digunakan untuk mendapatkan kuat medan maksimal dari tingkat tegangan lainnya. Hasil perhitungan kuat medan maksimal pada berbagai tingkat tegangan ditunjukkan pada Tabel 4.12.

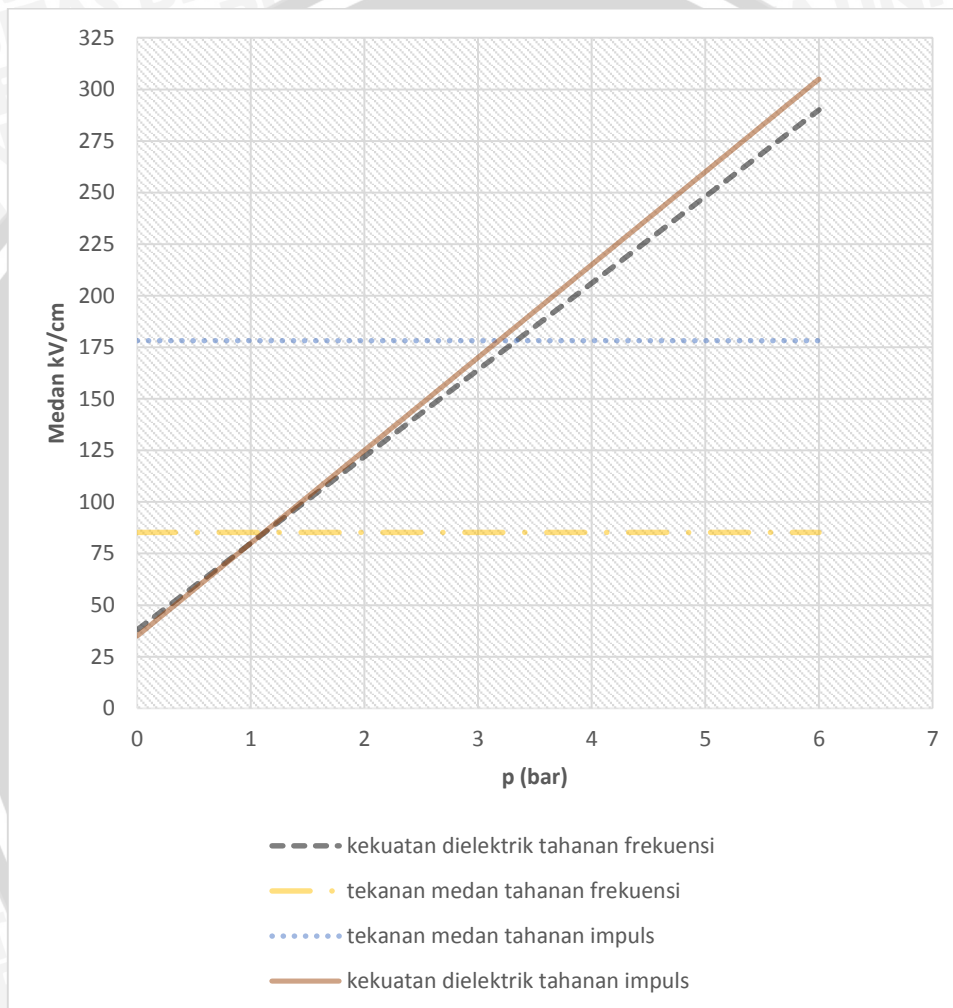
Tabel 4.11 Tekanan medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan berbeda

No.	Nama	Tingkat Tegangan (<i>kV</i>)	kuat medan maksimal (<i>kV/cm</i>)
1	Tegangan operasi	150	37,5
2	Tegangan tertinggi	169	42,25
3	Tegangan ketahanan frekuensi 50 Hz	341	85,25
4	Tegangan ketahanan impuls	715	178,75

Sumber: Hasil perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.11 telah ditunjukkan bahwa dengan semakin besar tingkat tegangan maka kuat medan maksimal juga akan semakin besar, oleh karena itu dibutuhkan kuat medan dielektrik yang mampu menahan kuat medan yang dihasilkan oleh tingkat tegangan terbesar.

Hubungan antara tekanan gas dan kuat medan maksimal yang didasarkan pada persamaan (2-6) dan persamaan (2-7) ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Hubungan antara tekanan gas SF₆ dan kekuatan medan dielektrik
Sumber: Perhitungan

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa penambahan tekanan gas SF₆ akan mengakibatkan peningkatan kekuatan medan dielektrik dari gas SF₆. Dan besarnya nilai dari kuat medan AC yang tertinggi adalah kuat medan yang dihasilkan dari ketahanan frekuensi 50 Hz yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5 dengan nilai $85,25 \frac{kV}{cm}$. Sedangkan

tekanan medan maksimal yang terjadi adalah tekanan medan yang dihasilkan oleh ketahanan impuls yang memiliki nilai $178,75 \frac{kV}{cm}$.

Tekanan gas SF₆ yang diperlukan untuk menahan tekanan medan maksimal yang terjadi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2-6) yang ditunjukkan pada perhitungan berikut:

$$E_{AC} = 42.p + 38 \text{ kV/cm}, \text{ digunakan untuk menahan tegangan frekuensi 50 Hz.}$$

Dengan diketahuinya nilai tekanan medan frekuensi 50 Hz sebesar $85,25 \text{ kV/cm}$ maka tekanan gas yang dibutuhkan adalah:

$$E_{AC} = 42.p + 38 \text{ kV/cm}$$

$$85,25 = 42.p + 38 \text{ kV/cm}$$

$$p = \frac{85,25 - 38}{42} \text{ bar}$$

$$p = 1,125 \text{ bar}$$

Jadi tekanan gas SF₆ yang dihasilkan dari perhitungan agar mampu menahan kuat medan maksimal yang ditimbulkan dari tingkat tegangan ketahanan frekuensi 50 Hz adalah $1,125 \text{ bar}$. Tekanan gas SF₆ sebesar $1,125 \text{ bar}$ juga mampu menahan kuat medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan AC yang lainnya karena nilai dari kuat medan pada tingkat tegangan ketahanan frekuensi 50 Hz lebih besar dari pada tekanan medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan operasi sistem dan tingkat tegangan tertinggi AC dari sistem.

Dan untuk perhitungan kuat medan maksimal dielektrik yang didasarkan pada tingkat tegangan ketahanan tegangan impuls mempunyai perhitungan yang berbeda dari tingkat tegangan AC yang didasarkan pada persamaan (2-7) berikut:

$$E_{imp} = 45.p + 35 \text{ kV/cm},$$

Dengan diketahuinya nilai tekanan medan impuls (E_{imp}) sebesar $178,75 \text{ kV/cm}$ maka tekanan gas yang dibutuhkan adalah:

$$E_{imp} = 45.p + 35 \text{ kV/cm},$$

$$178,75 = 45 \cdot p + 35 \text{ kV/cm}$$

$$p = \frac{178,75 - 35}{45} \text{ bar}$$

$$p = 3,2 \text{ bar}$$

Jadi tekanan gas SF₆ minimal yang didapatkan dari perhitungan agar mampu menahan kuat medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan impuls adalah sebesar 3,2 bar.

Hasil dari perhitungan tekanan gas SF₆ yang dihasilkan dari perhitungan ditunjukkan kembali pada Tabel 4.13.

Tabel 4.12 Tekanan gas SF₆ yang dihasilkan dari kuat medan maksimal

No.	Jenis tekanan	Kuat medan (E_{AC}) dalam kV/cm	Tekanan (p) dalam bar
1	Tekanan medan (E_{AC})	85,25	1,125
2	Tekanan medan (E_{imp})	178,75	3,2

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.12 menunjukkan bahwa tekanan gas SF₆ yang dibutuhkan untuk menahan kuat medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan ketahanan impuls memiliki nilai yang lebih besar bila dibandingkan dengan tekanan gas SF₆ yang dibutuhkan untuk menahan kuat medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan ketahanan frekuensi 50 Hz.

Sebelum tekanan dielektrik ditentukan, yang dihitung terlebih dahulu adalah faktor keamanan dari tekanan medan yang ditimbulkan dari berbagai tingkat tegangan. Faktor keamanan dihasilkan dari perbandingan antara tekanan medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan terbesar dengan tekanan medan yang dihasilkan dari tingkat tegangan yang lainnya yang lebih kecil. Faktor keamanan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Faktor keamanan disain busbar yang dihasilkan dari perbandingan berbagai tekanan medan

No.	Nama	Tingkat Tegangan (kV)	Kuat medan maksimal (kV/cm)	kuat medan tertinggi (kV/cm)	Faktor keamanan
1	Tegangan operasi	150	37,5	178,75	4,8
2	Tegangan tertinggi	169	42,25	178,75	4,2
3	Tegangan ketahanan frekuensi 50 Hz	341	85,25	178,75	2,1
4	Tegangan ketahanan impuls	715	178,75	178,75	1

Sumber: Hasil perhitungan

Tabel 4.14 menunjukkan bahwa terjadi perbedaan yang signifikan antara faktor keamanan yang dihasilkan dari tekanan yang ditimbulkan oleh tegangan operasi dan tegangan ketahanan impuls. Tingkat tegangan operasi membutuhkan perlindungan samapai 4,8 kali bila dibandingkan dengan tingkat tegangan ketahanan impuls yang digunakan. Jadi dari faktor keamanan yang dihasilkan dapat dipilih tingkat tegangan yang digunakan adalah tingkat tegangan ketahanan impuls.

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan maka tekanan gas SF₆ yang dipilih untuk tekanan gas disain adalah 3,2 bar.

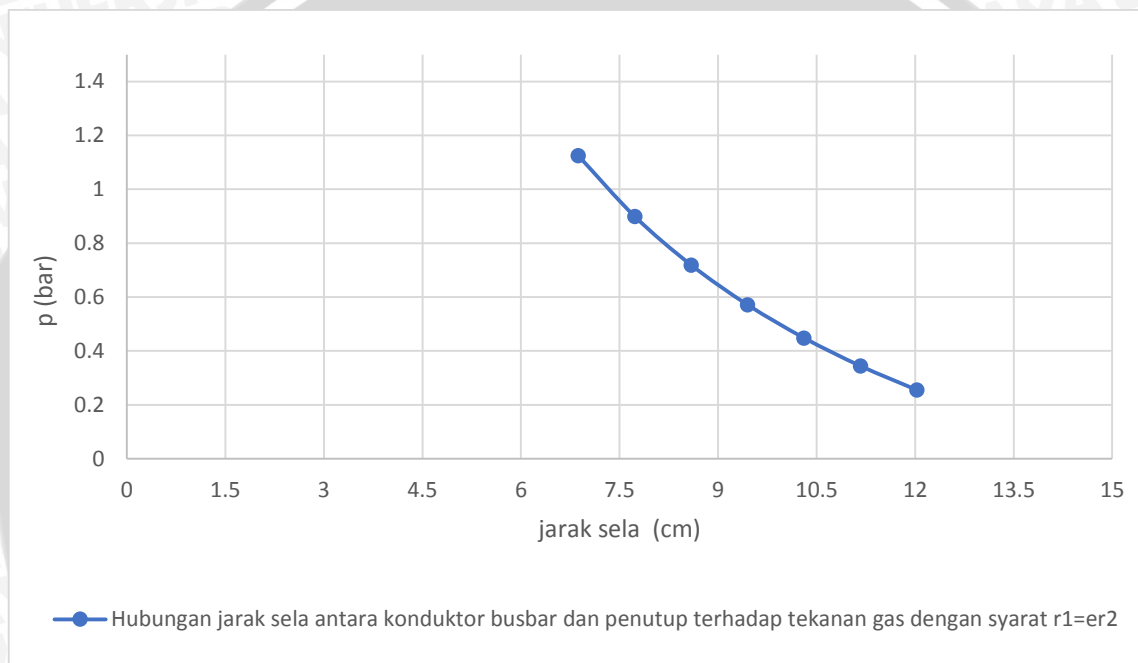
Sedangkan hubungan antara perubahan dimensi busbar dan perubahan tekanan busbar ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Hubungan antara perubahan dimensi busbar terhadap tekanan gas SF₆

r_1 (cm)	r_2 (cm)	jarak sela (cm)	U_{dmax} (kV)	E_{max} ($\frac{kV}{cm}$)	p (bar)
4	10.872	6.872	341	85.25	1.125
4.5	12.231	7.731	341	75.77778	0.899471
5	13.59	8.59	341	68.2	0.719048
5.5	14.949	9.449	341	62	0.571429
6	16.308	10.308	341	56.83333	0.448413
6.5	17.667	11.167	341	52.46154	0.344322
7	19.026	12.026	341	48.71429	0.255102

Sumber: Perhitungan

Penentuan nilai dimensi *busbar* pada Tabel 4.14 didasarkan pada ketahanan *busbar* tersebut menahan tegangan frekuensi jala – jala 50 Hz, karena penentuan dimensi *busbar* didasarkan pada ketahanan *busbar* tersebut dalam menahan tegangan frekuensi jala – jala 50 Hz yang mempunyai nilai 341 V. Pada Tabel 4.14 tersebut juga menunjukkan adanya perubahan nilai tekanan gas SF₆ yang diakibatkan oleh perubahan dimensi *busbar*. Untuk memperjelas hubungan antara perubahan nilai dimensi *busbar* terhadap tekanan gas maka dibuat Grafik hubungan antara perubahan dimensi *busbar* terhadap tekanan gas yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Hubungan antara perubahan dimensi terhadap tekanan gas SF₆
Sumber: Perhitungan

Nilai – nilai yang terlihat pada Gambar 4.6 didapatkan dari perhitungan optimasi medan dan perhitungan tekanan dengan menjadikan tingkat tegangan kerja *busbar* untuk semua dimensi memiliki nilai yang sama yaitu 150 kV. Telah diketahui bahwa untuk *busbar* yang memiliki tegangan kerja 150 kV harus mampu menahan tegangan frekuensi jala – jala 50 Hz yang mempunyai nilai sebesar 341 kV, nilai tersebut dijadikan parameter yang konstan sehingga mampu didapatkan nilai tekanan gas yang bervariasi sesuai dengan besarnya dimensi *busbar* dan penutup. Dan berdasarkan Gambar 4.6 dapat ditarik kesimpulan bahwa perubahan dimensi *busbar* yang menjadi besar mengakibatkan nilai tekanan gas SF₆ menjadi kecil,

4.6 Analisis Dimensi Penutup Busbar

Dalam penentuan dimensi total sebuah busbar yang diisolasi oleh gas SF₆ maka hal yang utama untuk ditentukan selain material penyusun busbar, jari – jari konduktor bagian luar dan jari – jari penutup bagian dalam adalah ketebalan dari penutup busbar yang terbuat dari metal. Penutup busbar berfungsi untuk menjaga agar gas SF₆ tetap terjaga kesetabilan tekanannya dan penutup busbar juga berfungsi untuk melindungi busbar dari gangguan luar.

Penentuan nilai dari ketebalan penutup busbar ditentukan oleh besarnya tegangan yang mampu ditahan oleh penutup tersebut. Ketebalan penutup busbar tersusun atas ketebalan penutup metal dan juga ketebalan insulator. Ketebalan penutup metal dapat ditentukan berdasarkan arus balik yang mengalir pada penutup metal tersebut dan juga berdasarkan kemampuan metal tersebut menahan tekanan gas dari dalam.

Apabila ditentukan ketebalan penutup metal didasarkan pada arus balik yang mengalir pada metal, maka besar nilai arus balik pada penutup metal menurut Herman J Kock mencapai 90% dari arus operasi pada konduktor. Dengan diketahuinya nilai dari kuat hantar arus konduktor pada material tembaga adalah 1720 A, maka besarnya arus balik (I_r) pada penutup adalah:

$$I_r = 90 \% \times I_{KHA}$$

$$I_r = 90 \% \times 1750$$

$$I_r = 1575 A$$

Dengan diketahuinya arus balik pada penutup metal sebesar 1575 A, maka berdasarkan Tabel 4.2 diperoleh ketebalan penutup metal tembaga (t_{mt}) adalah 4 mm. Pemilihan ketebalan penutup tersebut didasarkan pada konduktor yang mampu menghantarkan arus secara – terus menerus sebesar 1575 A. Dikarenakan arus 1575 A tidak terdapat pada standar maka dipilih arus yang mendekati nilai tersebut yaitu 1600 A yang memiliki tebal 4 mm. Dengan cara yang sama ketebalan penutup aluminium juga dapat ditentukan, dengan diketahuinya kuat hantar arus pada konduktor aluminium adalah 1593 A maka ketebalan penutup metal aluminium (t_{mt}) yang didapatkan adalah 4 mm. dengan KHA 1600 A. Kedua nilai tersebut dipilih pada tingkatan diameter 80 mm yang sesuai dengan hasil yang diperoleh dari perhitungan sebelumnya.

Dan apabila disesuaikan dengan kemampuan penutup metal tersebut menahan tekanan gas dari dalam, maka penentuan ketebalan metal juga dapat dihitung dengan merujuk pada persamaan (2-5) berikut:

$$t_{mp} = \frac{p \cdot r_i}{fE - 0,6p} \text{ inci}$$

Dengan menggunakan material aluminium telah ditentukan:

Tekanan gas (p) : nilai tekanan gas ditentukan menjadi dua kali lipat dari sebelumnya untuk memmberikan faktor keamanan, nilai yang dipilih adalah 6,4 bar,

Jari – jari penutup (r_i) : 10,87 cm,

Faktor pengelasan (E) : ditentukan bahan tabung berjenis tanpa sambungan sehingga nilai dari faktor pengalasan adalah 1,

Tekanan material yang diizinkan (f) : 1,4 ksi berdasarkan ASME B31.3-2012,

Jadi,

$$t_{mp} = \frac{p \cdot r_i}{fE - 0,6p} \text{ inci}$$

$$t_{mp} = \frac{94,1 \times 4,3}{1419 \times 1 - 0,6 \times 94,1} \text{ inci}$$

$$t_{mp} = 0,3 \text{ inci}$$

$$t_{mp} = 0,762 \text{ cm}$$

$$t_{mp} = 7,62 \text{ mm}$$

Jadi ketebalan metal (t_{mp}) yang digunakan sebagai penutup yang menggunakan material aluminium agar mampu menahakan tekanan gas SF₆ adalah 7,62 mm.

Bila material yang digunakan tembaga maka:

Tekanan material yang diizinkan (f) : 11,6 MPa berdasarkan ASME B31.3-2012,

Tekanan gas (p) : nilai tekanan gas ditentukan menjadi dua kali lipat dari sebelumnya untuk memmberikan faktor keamanan, nilai yang dipilih adalah 6,4 bar,

Jari – jari penutup (r_i) : 10,87 cm,

Faktor pengelasan (E) : ditentukan bahan tabung berjenis tanpa sambungan sehingga nilai dari faktor pengelasan adalah 1,

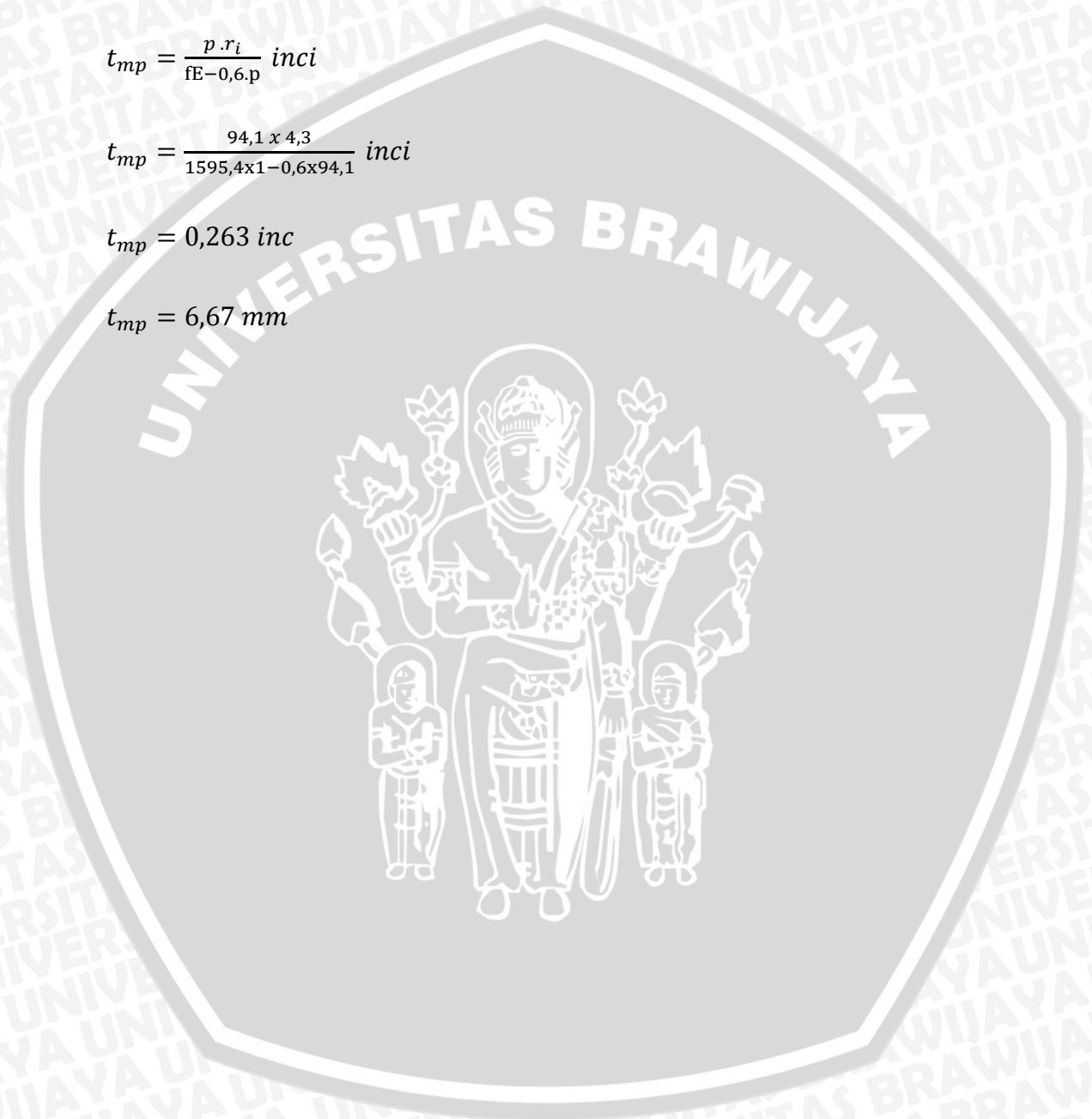
Maka:

$$t_{mp} = \frac{p \cdot r_i}{fE - 0,6p} \text{ inci}$$

$$t_{mp} = \frac{94,1 \times 4,3}{1595,4 \times 1 - 0,6 \times 94,1} \text{ inci}$$

$$t_{mp} = 0,263 \text{ inc}$$

$$t_{mp} = 6,67 \text{ mm}$$



BAB V PENUTUP

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dalam penelitian yang berjudul “Rancang Bangun *Busbar* 150 kV dengan Isolasi Gas SF₆ di Gardu Induk Sengkaling”, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. a. Perancangan *busbar* 150 kV dengan Isolasi Gas SF₆ di Gardu Induk didasarkan pada KHA konduktor *busbar*, kemampuan konduktor tersebut menahan arus gangguan hubung singkat dan kemampuan *busbar* tersebut dalam menahan tegangan ketahanan frekuensi jala – jala 50 Hz dan tegangan ketahanan impuls.

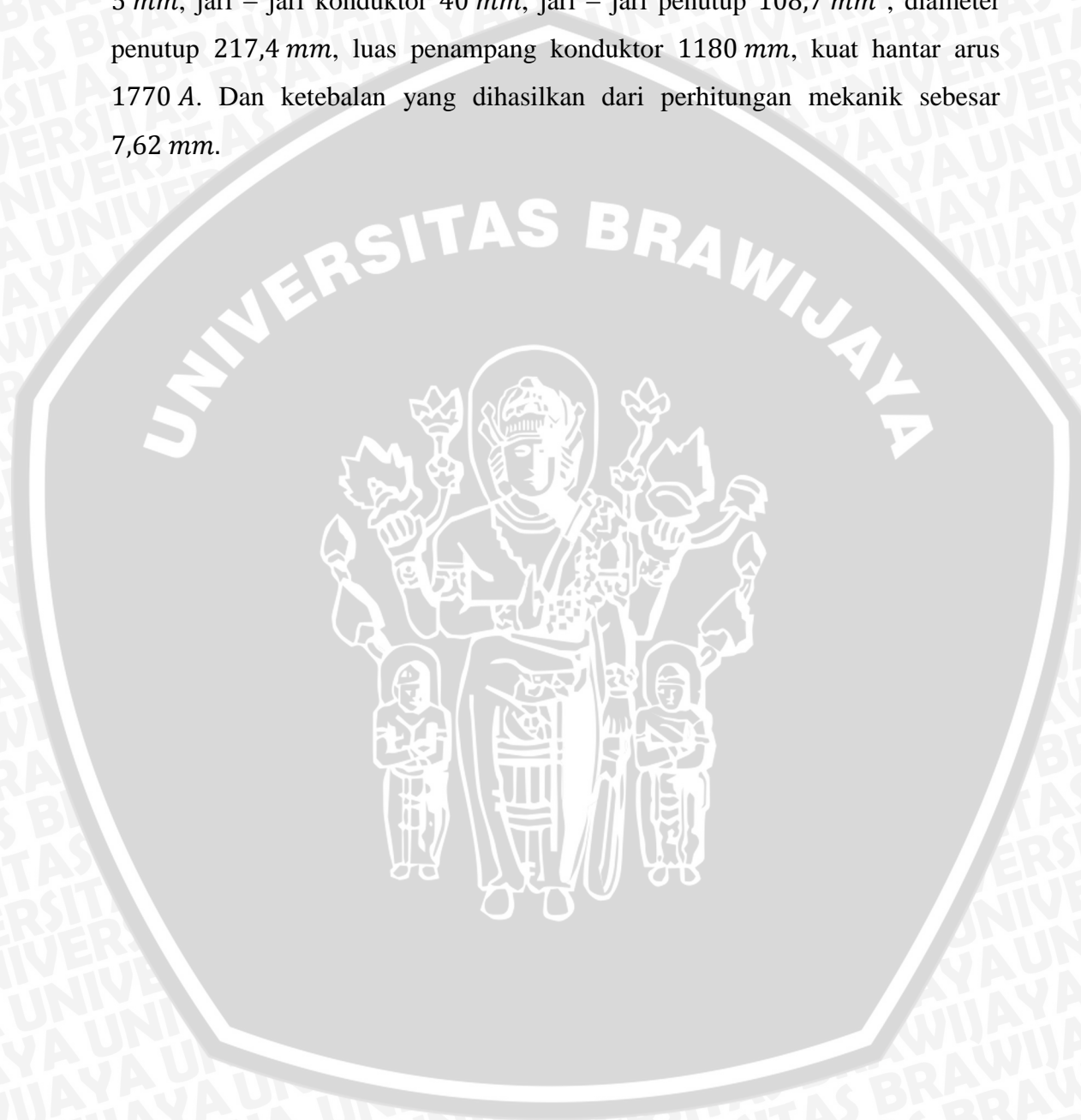
b. Penentuan dimensi konduktor *busbar* menggunakan metode yang didasarkan pada ketahanan terhadap arus hubung singkat karena dimensi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan metode yang menggunakan KHA. Hasil yang didapat dari KHA tidak memenuhi persyaratan temperatur. Selanjutnya hasil yang dipilih tersebut disesuaikan dengan kemampuan *busbar* tersebut dalam menahan tegangan ketahanan frekuensi jala – jala 50 Hz.

c. Penentuan jarak konduktor penutup terhadap konduktor *busbar* didasarkan pada persamaan optimasi medan dan dihasilkan nilai sebesar 6,87 cm, sedangkan penentuan ketebalan penutup didasarkan pada kemampuan *busbar* menahan tekanan gas SF₆. Tekanan gas SF₆ dipengaruhi oleh kuat medan yang harus ditahan. Tekanan yang dibutuhkan untuk menahan kuat medan yang ditimbulkan dari tegangan ketahanan frekuensi jala – jala adalah 1,125 bar sedangkan untuk tegangan ketahanan impuls adalah 3,2 bar, oleh karena itu dipilih tekanan gas yang besar yaitu 3,2 bar agar mampu menahan tekanan medan yang besar.

2. Dari hasil perancangan didapatkan spesifikasi *busbar* 150 kV dengan arus nominal sebesar 346,4 A yang menggunakan material tembaga mempunyai dimensi diameter konduktor sebesar 80 mm, luas penampang konduktor 3 mm, jari – jari konduktor 40 mm, jari – jari penutup 108,7 mm, diameter penutup

217,4 mm, luas penampang konduktor 726 mm, kuat hantar arus 1750 A. Dan ketebalan yang dihasilkan dari perhitungan mekanik sebesar 6,67 mm.

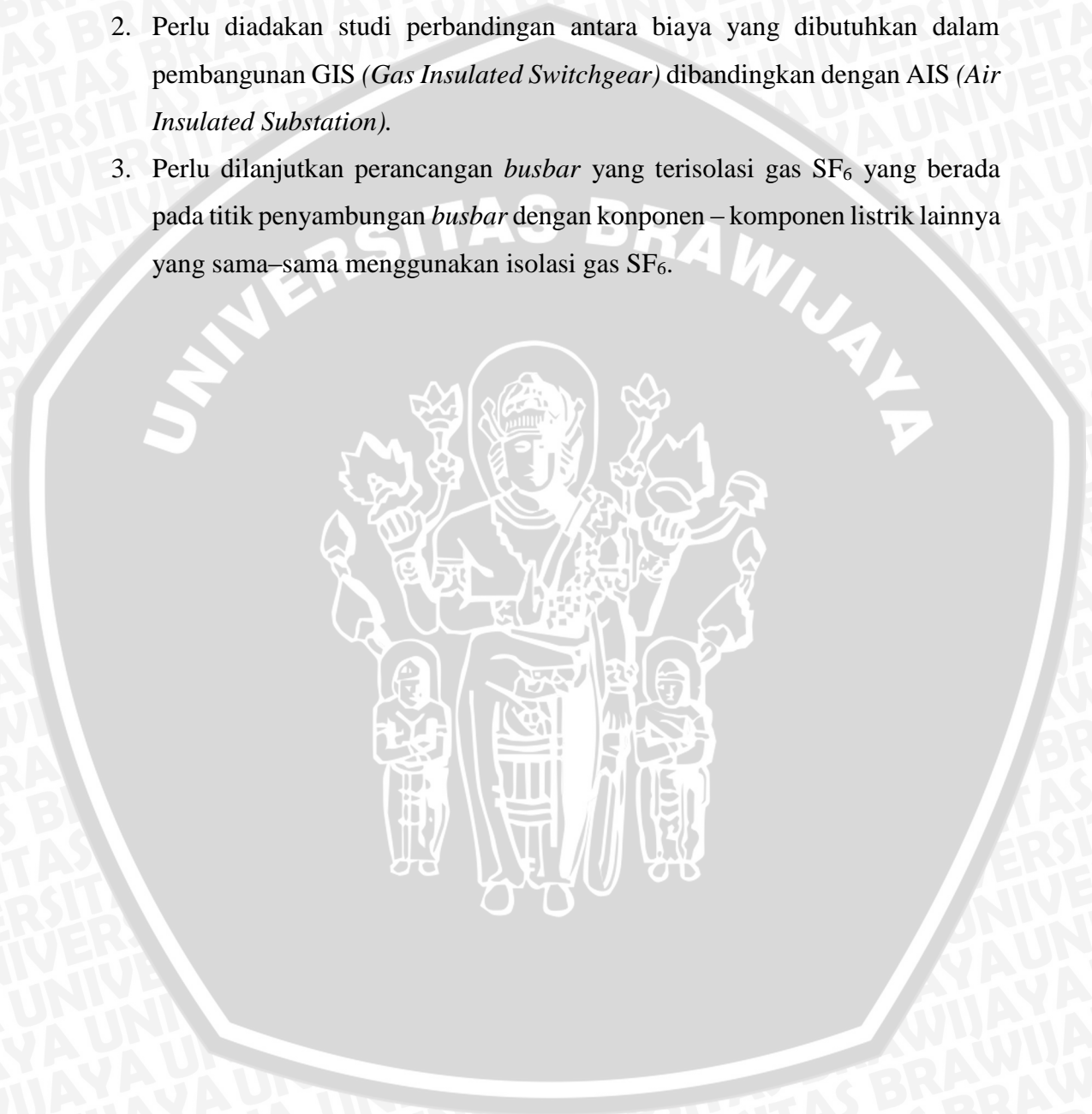
Dan apabila material aluminium yang digunakan maka dimensi busbar tersebut memiliki diameter konduktor sebesar 80 mm, luas penampang konduktor 5 mm, jari – jari konduktor 40 mm, jari – jari penutup 108,7 mm , diameter penutup 217,4 mm, luas penampang konduktor 1180 mm, kuat hantar arus 1770 A. Dan ketebalan yang dihasilkan dari perhitungan mekanik sebesar 7,62 mm.



5.2 Saran

Berdasarkan hasil analysis pada penelitian ini maka diperlukan beberapa saran dalam perancangan *busbar* untuk kedepannya yaitu:

1. Perlu diadakan studi pengaruh perubahan temperatur yang ekstrim terhadap perancangan dimensi *busbar*.
2. Perlu diadakan studi perbandingan antara biaya yang dibutuhkan dalam pembangunan GIS (*Gas Insulated Switchgear*) dibandingkan dengan AIS (*Air Insulated Substation*).
3. Perlu dilanjutkan perancangan *busbar* yang terisolasi gas SF₆ yang berada pada titik penyambungan *busbar* dengan komponen – komponen listrik lainnya yang sama–sama menggunakan isolasi gas SF₆.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdelsalam M. Husain Anis. Ahdap El – Morsyedi et al., 2000. *High-Voltage Engineering: Theory and Practice*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Agrawal K.C., 2001. *Industrial Power Engineer Handbook*. Great Britain: Butterworth – Heinemann.
- Arismunandar, A., 1982. *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Arora Ravinda, Wolfgang Mosch., 2011. *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Brownell Lloyd E, Young Edwin H., 1959. *Process Equipment Design: Vessel Design*. United States of America: John Wiley & Sons Inc.
- E. Kuffel., W.S. Zaengl., J. Kuffel., 2000. *High Voltage Engineering Fundamentals Second edition*. India: Butterworth – Heinemann.
- Garzon Ruben D. 1997. *High Voltage Circuit Breaker*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- IEEE Std C37.122.1. “*IEEE Guid for Gas Insulated Substation*”. 29 Oktober 2002.
- IEEE Std C37.38.”*An American National Standard IEEE Standard for Gas-Insulated, Metal - Enclosed Disconnecting, Interrupter, and Grounding Switches*”. 2 Februari 1989.
- Jhon D. McDonald., 2007. *Electric Power Substation Engineering Second Edition*. U.S.A: CRC Press.
- J Kock Herman., 2014. *Gas Insulated Substation*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Kawaguci, Y, K. Sakata. S. Menju. 1971. *Effect of Grounded Cylinder Enclouser on the Breakdown Gradien of Road Gaps in SF₆*. IEEE, December 1971.
- Kempner Leon., 2008. *Substation Structur Design Guide*. Virginia: American Society Civil Engineer.
- Kind Dieter and Hermann Kamer., 1985, *High-Voltage Insulation Thchnology*. Jerman: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig.
- Maller V. N. and Naidu M. S., 2011. *Advance in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF₆ and Vacuum*. Australia: Pergamon Press.

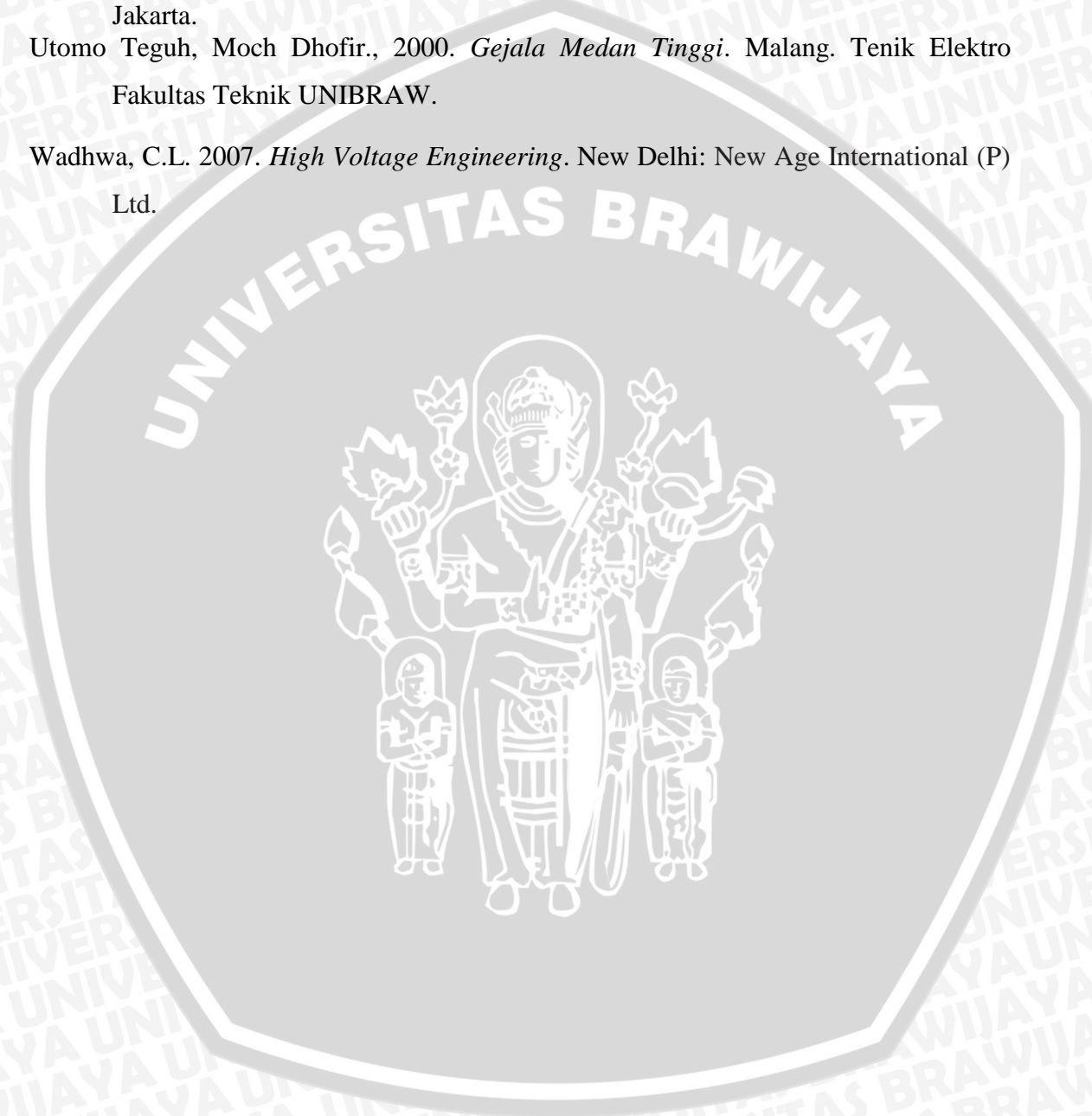
Naidu & Karamaju., 1982. *High Voltage Engineering*. New Delhi: Tata McGraw – Hill Publishing Company Limited.

Naidu M.S., 2008. *Gas Insulated Substation*. New Delhi: I.K International Pubishing House Pvt Ltd.

SNI 04-0225, 2000. Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000). BSN - Jakarta.

Utomo Teguh, Moch Dhofir., 2000. *Gejala Medan Tinggi*. Malang. Tenik Elektro Fakultas Teknik UNIBRAW.

Wadhwa, C.L. 2007. *High Voltage Engineering*. New Delhi: New Age International (P) Ltd.



LAMPIRAN



Lampiran 2 Standar Rating Tegangan ANSI/IEEE C37.38-1989

DISCONNECTING, INTERRUPTER, AND GROUNDING SWITCHES

ANSI/IEEE C37.38-1989

Table 1— Voltage Ratings for Gas-Insulated, Metal-Enclosed Disconnecting, Interrupter, and Grounding Switches at Normal Operating Gas Density

Rated Maximum Voltage (kV rms)	Rated BIL (kV Crest)	Substation Test Values			Disconnect Switch Open Gap		
		Low-Frequency Withstand (kV rms)	Switching Impulse Withstand (kV Crest)	Rated Field Tests Low-Frequency Withstand (kV rms)	Impulse Withstand (kV Crest)	Low Frequency Withstand (kV rms)	Switching Impulse Withstand (kV Crest)
72.5	300	140	—	105	330	154	—
72.5	350	160	—	120	385	176	—
121	450	215	—	160	495	236	—
121	550	260	—	195	605	286	—
145	550	260	—	195	605	286	—
145	650	310	—	230	715	341	—
169	650	310	—	230	715	341	—
169	750	365	—	270	825	401	—
242	750	365	—	270	825	401	—
242	900	425	—	320	990	467	—
362	900	425	720	320	990	467	800
362	1050	500	825	375	1155	550	900
550	1300	615	1050	460	1430	676	1175
550	1500	740	1175	550	1705	814	1300
800	1800	860	1425	645	1980	946	1550

NOTES:

- 1 — Refer to columns 5, 6, and 7. For certain switches energized at normal voltage on one terminal and subject to impulse or switching surges on the other side, such as line switches in a ring bus, higher open-gap withstand voltages may be desirable. However, it should be remembered that an open-gap flashover in a gas-insulated switch must promptly initiate a flashover to ground at all gas pressures from atmospheric to maximum rated, which then would clear the circuit in about four cycles, depending on relaying, breaker speeds, etc.
- 2 — Routine low-frequency, one-minute withstand tests are conducted prior to shipment from the factory at the rated withstand voltage shown in column 2.
- 3 — The values given in columns 5, 6, and 7 are provided for design criteria.
- 4 — For rated maximum voltage 72.5 kV to 242 kV, switching impulse shall be at least the crest value of those given in column 2.

Lampiran 3 Standar Batas Maksimum Temperatur

IEEE Std C37.100.1
IEEE Standard of Common Requirements for High-Voltage Power Switchgear Rated Above 1000 V

Table 3—Limits of temperature and temperature rise for various parts, materials, and dielectrics of high-voltage switchgear

Nature of the part, of the material and of the dielectric (see points and notes below)	Maximum value	
	Temperature (°C)	Temperature rise at ambient air temperature not exceeding 40 °C (K) (See Note 3)
1	Contacts (see point 4)	
	Bare-copper or bare-copper alloy	
	— In air	75
	— In SF ₆ (sulfur hexafluoride (see point 5))	105
	— In oil	80
	— Temperature rise	35
	Silver-coated or nickel-coated (see point 6)	
	— In air	105
	— In SF ₆ (see point 5)	105
	— In oil	90
	— Temperature rise	65
	Tin-coated (see point 6)	
	— In air	90
	— In SF ₆ (see point 5)	90
	— In oil	90
	— Temperature rise	50
2	Connection, bolted or the equivalent (see point 4)	
	Bare-copper, bare-copper alloy or bare-aluminum alloy	
	— In air	90
	— In SF ₆ (see point 5)	115
	— In oil	100
	— Temperature rise	50
	Silver-coated or nickel-coated	
	— In air	115
	— In SF ₆ (see point 5)	115
	— In oil	100
	— Temperature rise	75
	Tin-coated	
	— In air	105
	— In SF ₆ (see point 5)	105
	— In oil	100
	— Temperature rise	65
3	All other contacts or connections made of bare metals or coated with other materials	(See point 7)
		(See point 7)
4	Terminals for the connection to external conductors by screws or bolts (see points 8 and 14)	(See point 14)
	— Bare	90
	— Silver, nickel or tin-coated	105
	— Other coatings	(See point 7)
		(See point 7)
5	Oil for oil switching devices (see points 9 and 10)	90
		50
6	Metal parts acting as springs	(See point 11)
		(See point 11)

Lampiran 4 Standar Kelas Isolasi

IEEE Std C37.100.1
IEEE Standard of Common Requirements for High-Voltage Power Switchgear Rated Above 1000 V

Table 3—Limits of temperature and temperature rise for various parts, materials, and dielectrics of high-voltage switchgear (continued)

Nature of the part, of the material and of the dielectric (see points and notes below)	Maximum value	
	Temperature (°C)	Temperature rise at ambient air temperature not exceeding 40 °C (K) (See Note 3)
7 Materials used as insulation and metal parts in contact with insulation of the following classes (see point 12) — Y — A — E — B — F — Enamel: oil base synthetic — H — C other insulating material	90 105 120 130 155 100 120 180 (See point 13)	50 65 80 90 115 60 80 140 (See point 13)
8 Any part of metal or of insulating material in contact with oil, except contacts	100	60
9 Accessible parts (See Note 4) — Expected to be touched in normal operation — Which need not be touched in normal operation	50 70	

NOTE 1—The points referred to in this table are those of 4.4.3.

NOTE 2—Refer to Annex J for a discussion of this table with respect to the comparable table in IEC 62271-1:2007 [B23] and to the requirements of several relevant equipment standards.

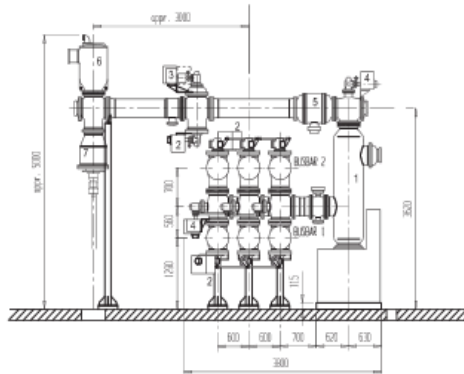
NOTE 3—The symbol "K" for the kelvin is used in this standard to refer to a temperature increment. As a temperature increment (e.g., temperature rise), the degree kelvin is equal to the degree Celsius, 1 K = 1 °C = 1.8 °F; as temperature on a scale, 273.15 K = 0 °C = 32 °F and 0 K is absolute zero. The kelvin is written as "K" without the "°" degree symbol.

NOTE 4—The maximum value temperatures for group 9 are lower than those given in the comparable table in IEC 62271-1:2007 [B23]. See Annex J.

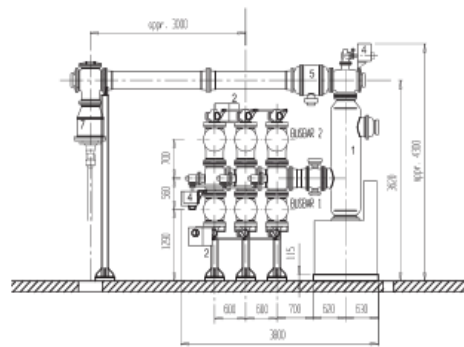
Adapted with permission from the International Electrotechnical Commission. Copyright © 2007 IEC, Geneva, Switzerland. www.iec.ch.

Lampiran 5 Gambar lay out dimensi busbar yang terisolasi oleh gas SF₆

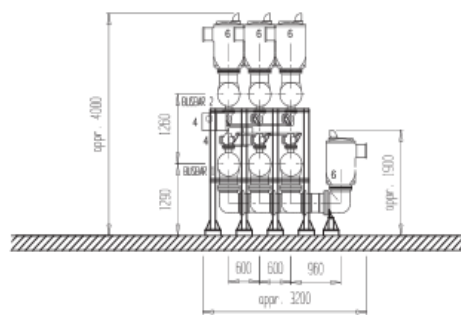
Outline drawings **GAI3**



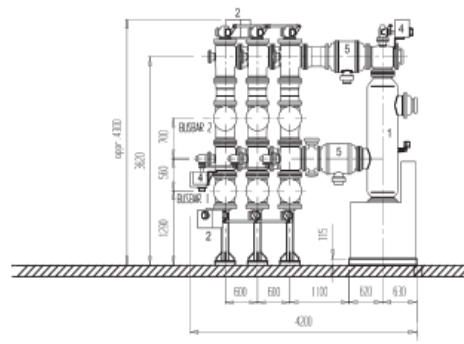
Feeder bay with VT



Transformer bay



Busbar earthing & measuring bay



Bus coupler bay

- 1 Circuit breaker
- 2 Disconnect
- 3 High-speed earthing switch
- 4 Maintenance earthing switch
- 5 Current transformer
- 6 Voltage transformer
- 7 Cable-end enclosure

All dimensions in millimetres.

Office **CG Electric Systems Hungary Zrt**
 Registered Office
 Máriássy utca 7, Floor IV
 1095 Budapest, Hungary
 T + 36 1 483 6762
 info.hu@cglobal.com

Sales **CG Holdings Belgium NV**
 Antwerpsesteenweg 167
 B-2810 Mechelen, Belgium
 T + 32 15 283 632
 F + 32 15 283 300

jo.renique@cglobal.com - www.cglobal.com



