

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Gardu Induk

2.1.1. Pengertian dan Fungsi

Gardu induk adalah suatu instalasi tenaga listrik yang terdiri dari bangunan dan peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik sesuai dengan kebutuhan pada tegangan tertentu. Gardu induk memiliki fungsi yaitu :

1. Sebagai tempat pengaturan beban, pembagian beban, sebagai tempat pengawasan, titik pusat kendali lokal apabila terjadi gangguan pada line transmisi di jaringan.
2. Mentransformasikan listrik dari tegangan ekstra tinggi ketegangan tinggi atau dari tegangan tinggi ketegangan menengah maupun sebaliknya.

Pada Gardu Induk terdapat trafo *step down* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan yang dikirim atau disuplai oleh PLTGU, G/S maupun GI lainnya. Misalnya PLTGU Muara Karang lama, PLTGU Muara Karang baru dan G/S Pantai Indah Kapuk. Selain itu, kadang pula GI Duri Kosambi mendapat suplai dari GI Cengkareng. Yang mana GI Cengkareng ini sendiri mendapat suplai dari PLTU Lontar. Gardu Induk Duri Kosambi ini menyalurkan tenaga listrik ke GI

Kebun Jeruk, LMK, GI Cengkareng, GI Petukangan, dan GI Grogol. Misalnya Gardu Induk Duri Kosambi ini mendapat suplai tegangan 150 kV kemudian diturunkan menjadi 20 kV.

2.1.2. Jenis-Jenis Gardu Induk

Jenis gardu induk dapat dibedakan menjadi beberapa bagian yaitu:

1. Berdasarkan besaran tegangannya.
2. Berdasarkan pemasangan peralatan.
3. Berdasarkan fungsinya.
4. Berdasarkan isolasi yang digunakan.
5. Berdasarkan rel (busbar).

2.1.3. Berdasarkan Besaran Tegangan

1. Gardu induk tegangan ekstra tinggi (GITET) 500 kV.
2. Gardu induk tegangan tinggi (GI) 150 kV, 275 kV dan 70 kV.

2.1.4. Berdasarkan Pemasangan Peralatan

1. Gardu Induk Pasangan Luar

Gardu induk yang sebagian luar komponennya ditempatkan di luar gedung, kecuali komponen kontrol, *system* proteksi dan *system* kendali serta komponen bantu lainnya ada di dalam gedung. Gardu induk semacam ini biasa disebut dengan gardu induk konvensional. Sebagian besar gardu induk di Indonesia

adalah gardu induk konvensional. GI Konvensional Gardu induk ini menggunakan udara sebagai media isolasi antar peralatan yang bertegangan.

2. Gardu Induk Pasangan Dalam

Gardu induk yang hampir semua komponennya (*switchgear*, busbar, isolator, komponen kontrol, komponen kendali, *cubicle*, dan lain-lain) dipasang dalam gedung. Kecuali transformator daya, pada umumnya dipasang di luar gedung. Gardu induk semacam ini biasa disebut *Gas Insulated Substation* (GIS).

Gas Insulated Substation (GIS) merupakan bentuk pengembangan gardu induk, yang pada umumnya dibangun di daerah perkotaan atau padat pemukiman yang sulit untuk mendapatkan lahan. GIS (Gas Insulated Switchgear) Gardu induk ini menggunakan gas SF₆ sebagai media isolasi pada peralatan yang bertegangan.

3. Gardu Induk Kombinasi Pasangan Luar dan Pasangan Dalam

Gardu induk yang komponen *switchgear*-nya ditempatkan di dalam gedung dan sebagian komponen *switchgear* ditempatkan di luar gedung, misalnya *tie line* dan saluran udara tegangan tinggi (SUTT) sebelum masuk ke dalam *switchgear*. Transformator daya juga ditempatkan di luar gedung.

2.1.5. Berdasarkan Fungsi

1. Gardu Induk Penaik Tegangan

Gardu induk yang berfungsi untuk menaikkan tegangan, yaitu tegangan pembangkit (generator) dinaikkan menjadi tegangan *system*. Gardu induk ini berada di lokasi pembangkit tenaga listrik. Karena *output voltage* yang dihasilkan pembangkit listrik kecil dan harus disalurkan pada jarak yang jauh, maka dengan pertimbangan efisiensi, tegangannya dinaikkan menjadi tegangan ekstra tinggi atau tegangan tinggi.

2. Gardu Induk Penurun Tegangan

Gardu induk yang berfungsi untuk menurunkan tegangan, dari tegangan ekstra tinggi menjadi tegangan tinggi, dan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah (menengah) atau tegangan distribusi. Gardu induk terletak di daerah pusat-pusat beban, karena di gardu induk inilah pelanggan (beban) dilayani.

3. Gardu Induk Pengatur Tegangan

Pada umumnya gardu induk jenis ini terletak jauh dari pembangkit tenaga listrik. Karena listrik disalurkan sangat jauh, maka terjadi tegangan jatuh (*voltage drop*) transmisi yang cukup besar. Oleh karena itu dibutuhkan alat penaik tegangan seperti *bank capacitor*, sehingga tegangan kembali dalam keadaan normal.

4. Gardu Induk Pengatur Beban

Berfungsi untuk mengatur beban. Pada gardu induk ini terpasang beban motor, yang pada saat tertentu menjadi pembangkit tenaga listrik, motor berubah menjadi generator dan suatu saat generator menjadi motor atau menjadi beban. Dengan generator berubah menjadi motor yang memompakan air kembali ke kolam utama.

5. Gardu Distribusi

Gardu induk yang menyalurkan tenaga listrik dari tegangan *system* ke tegangan distribusi. Gardu induk ini terletak di dekat pusat-pusat beban.

2.1.6. Berdasarkan Isolasi yang Digunakan

1. Gardu Induk yang Menggunakan Isolasi Udara

Gardu induk yang menggunakan isolasi udara antara bagian yang bertegangan yang satu dengan bagian yang bertegangan lainnya. Gardu induk ini berupa gardu induk konvensional, dan gardu induk ini memerlukan tempat terbuka yang cukup luas.

2. Gardu Induk yang Menggunakan Isolasi Gas SF_6

Gardu induk yang menggunakan gas SF_6 sebagai isolasi antara bagian yang bertegangan yang satu dengan bagian lain

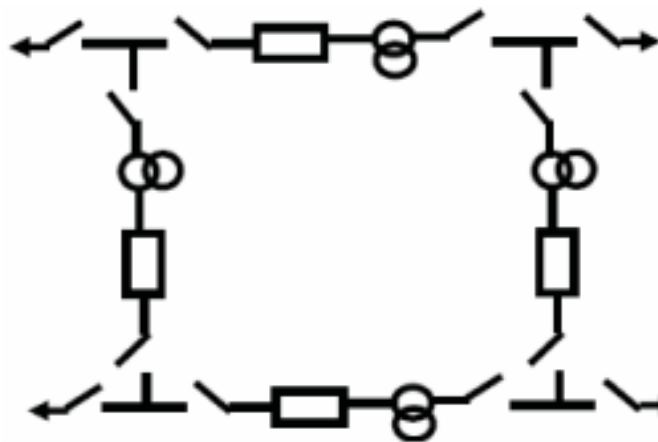
yang bertegangan, maupun antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan. Gardu induk ini disebut *Gas Insulated Substation* atau *Gas Insulated Switchgear (GIS)*, yang memerlukan tempat yang tidak luas (sempit).

2.1.7. Berdasarkan Sistem Rel (Busbar)

Rel (Busbar) merupakan titik hubungan pertemuan (*connecting*) antara transformator daya, SUTT/SKTT dengan komponen listrik lainnya, untuk menerima dan menyalurkan tenaga listrik. berdasarkan *system* rel (busbar) gardu induk dibagi menjadi beberapa jenis, sebagaimana tersebut di bawah ini :

1. Gardu Induk System Rel Busbar

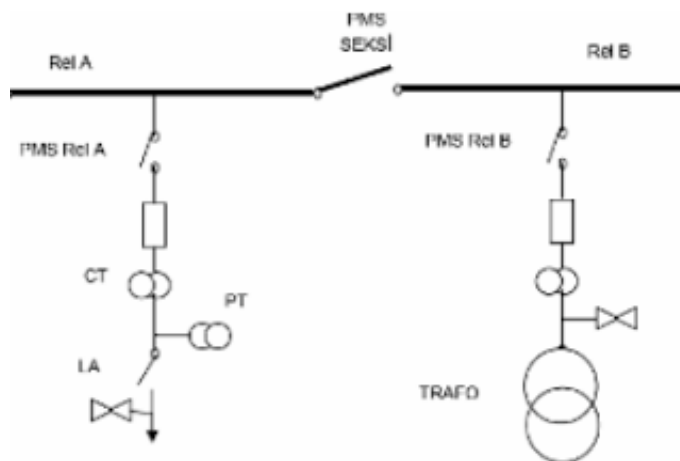
Gardu induk yang busbaranya berbentuk *ring*. Pada gardu induk jenis ini, semua rel (busbar) yang ada, tersambung (terhubung) satu dengan lainnya dan membentuk ring (cincin).



Gambar 2.1 System Cincin atau Ring

2. Gardu Induk System Single Busbar

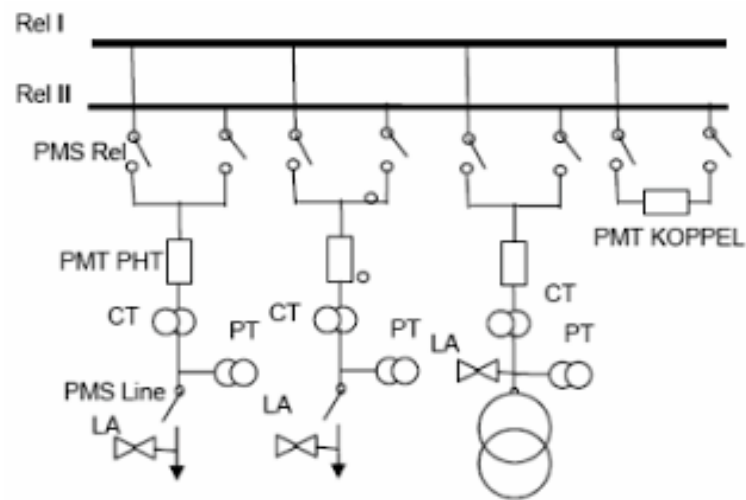
Gardu induk yang mempunyai satu (*single*) busbar. Pada umumnya gardu system ini adalah gardu induk yang berada pada ujung (akhir) dari suatu *system* transmisi.



Gambar 2.2 System Single Busbar

3. Gardu Induk System Double Busbar

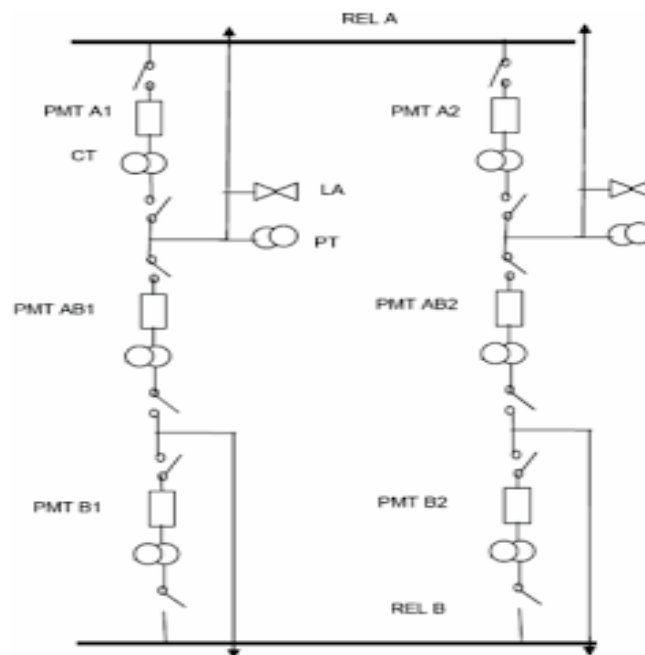
Gardu induk yang mempunyai dua (*double*) busbar. Gardu induk *system double* busbar sangat efektif untuk mengurangi terjadinya pemadaman beban, khususnya pada saat melakukan perubahan *system* (*maneuver system*). Jenis gardu induk ini pada umumnya yang banyak digunakan.



Gambar 2.3 System Double Busbar

4. Gardu Induk System Satu Setengah (*On Half*) Busbar

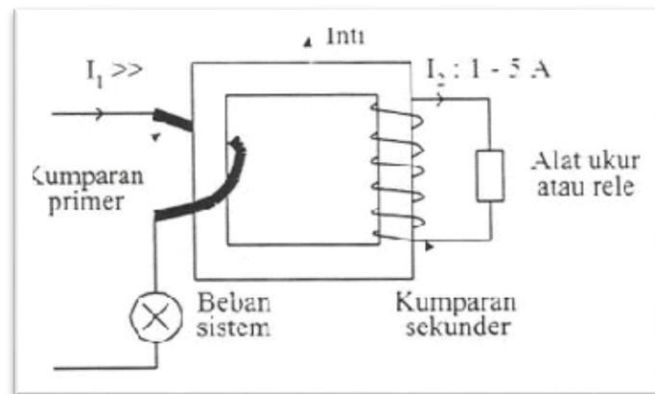
Gardu induk yang mempunyai dua (*double*) busbar. Pada umumnya gardu induk jenis ini dipasang pada gardu induk di pembangkit tenaga listrik atau gardu induk yang berkapasitas besar. Dalam segi operasional, gardu induk ini sangat efektif, karena dapat mengurangi pemadaman beban pada saat dilakukan perubahan *system* (*maneuver system*). *System* ini menggunakan 3 (tiga) buah *Circuit Breaker* (CB) dalam satu diagonal yang terpasang secara deret (seri).



Gambar 2.4 System On Half Busbar

2.1.8. Peralatan Gardu Induk

1. Transformator tenaga adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya. Di gardu induk Duri Kosambi beredapat 4 buah trafo (150 kV/20 kV) yang masing-masing mempunyai kapasitas 60 MVA.
2. Transformator tegangan (*PT*) berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah, yang diperlukan untuk alat-alat ukur (pengukuran) dan alat pengaman (proteksi).
3. Transformator arus (*CT*) berfungsi untuk menurunkan arus besar menjadi arus kecil untuk keperluan pengukuran dan pengaman (proteksi).



Gambar 2.5 Transformator Arus

4. Pemutus tenaga (PMT) atau *Circuit breaker (CB)* berfungsi untuk memutuskan hubungan tenaga listrik dalam keadaan gangguan maupun dalam keadaan berbeban dan proses ini harus dapat dilakukan dengan cepat. Di gardu induk terdapat PMT dengan menggunakan pemadam busur api SF_6
5. Pemisah (PMS) atau *Disconnecting Switch (DS)*
 - a. Pemisah tanah berfungsi untuk mengamankan peralatan dari sisa tegangan sesudah SUTT diputuskan atau induksi tegangan dari penghantar. Hal ini perlu untuk keamanan dari orang yang bekerja pada instalasi.
 - b. Pemisah peralatan berfungsi untuk mengisolasi peralatan listrik dari peralatan lain yang bertegangan.
6. *Lightning arrester* berfungsi untuk mengamankan instalasi (peralatan listrik pada instalasi) dari gangguan tegangan lebih yang diakibatkan oleh sambaran petir.

7. Busbar / rel pada gardu induk adalah sebagai titik pertemuan / hubungan trafo tenaga, SUTT, dan peralatan listrik lainnya untuk menerima dan menyalurkan daya listrik.
8. Trafo pemakaian sendiri ini berguna untuk kebutuhan listrik di suatu gardu induk misalnya untuk penerangan, *rectifier* dan peralatan lain yang memerlukan tenaga listrik. Di gardu induk terdapat trafo pemakaian sendiri
9. Baterai, sebagai sumber DC yang diperlukan oleh suatu gardu induk untuk menggerakkan peralatan kontrol, rel pengaman, motor penggerak PMT, PMS dan sebagainya. Untuk itu, sebagai sarannya maka disediakan baterai sebagai sumber catudaya tenaga DC. Baterai ini harus selalu terjaga kapasitasnya (harus selalu penuh) maka baterai setiap saat secara terus menerus harus terhubung dengan *rectifier*.
10. *Rectifier* berfungsi untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah sesuai kapasitas yang dikehendaki.
11. Panel kontrol
 - a. Panel kontrol utama terdiri dari panel instrumen dan panel operasi. Pada panel instrumen terpasang alat-alat ukur dan indikator gangguan, dari panel ini alat-alat tersebut dapat diawasi dalam keadaan sedang beroperasi. Pada panel operasi terpasang sakelar operasi dari pemutus tenaga, pemisah serta lampu indikator posisi sakelar dan diagram rel. Diagram rel, sakelar dan lampu indikator diatur letak dan

hubungannya sesuai dengan rangkaian yang sesungguhnya sehingga keadaannya dapat dilihat dengan mudah.

- b. Pada panel rel terpasang rel pengaman untuk SUTT, rel pengaman untuk trafo dan sebagainya. Bekerjanya rel dapat diketahui dari penunjukan pada rel itu sendiri dan pada indikator gangguan di panel kontrol utama.

12. Kubikel 20 kV adalah sistem *switchgear* untuk tegangan menengah (20 kV) yang berasal dari output trafo daya, yang selanjutnya diteruskan ke konsumen melalui penyulang (*feeder*) yang tersambung (terhubung) dengan kubikel tersebut. Dari penyulang (*feeder*) inilah listrik disalurkan (didistribusikan) ke pusat-pusat beban.

13. Rel adalah suatu saklar yang bekerja secara otomatis untuk mengatur / memasukan suatu rangkaian listrik (rangkaiannya *trip* atau *alarm*) akibat adanya perubahan lain.

- a. Rel berfungsi memberikan sinyal yang diteruskan untuk membuka PMT dengan tujuan mengisolir gangguan dan menjaga stabilitas sistem, misalnya adanya beban lebih, kenaikan suhu, hubung singkat dan kondisi lainnya.
- b. Syarat peralatan proteksi
 - 1) Sensitif yaitu mampu merasakan gangguan sekecil apapun.
 - 2) Andal yaitu akan bekerja bila diperlukan (dependability) dan tidak akan bekerja bila tidak diperlukan (security).

- 3) Selektif yaitu mampu memisahkan jaringan yang terganggu saja.
- 4) Cepat yaitu mampu bekerja secepat-cepatnya.
- c. Jenis rel pengaman di gardu induk
 - 1) Pengaman saluran / penghantar
 - 2) Pengaman busbar
 - 3) Pengaman transformator
 - 4) Pengaman alat bantu, trafo arus, dan trafo tegangan
- d. Macam-macam rel tegangan tinggi
 - 1) Rel jarak
 - 2) Rel *differensial*
 - 3) Rel arus lebih
 - 4) Rel gangguan tanah
 - 5) Rel tegangan lebih

2.2. Pemutus Tenaga

Pemutus Tenaga (PMT) adalah suatu peralatan pemutus rangkaian listrik pada suatu sistem tenaga listrik, yang mampu untuk membuka dan menutup rangkaian listrik pada semua kondisi, termasuk arus hubung singkat, sesuai dengan ratingnya. Juga pada kondisi tegangan yang normal ataupun tidak normal.

2.2.1. Fungsi Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) atau *CB (Circuit Breaker)* adalah salah satu peralatan yang terpasang di Gardu Induk, berfungsi untuk

menghubungkan atau memutuskan jaringan baik SUTT ataupun SUTM sesuai dengan ratingnya. Kecepatan untuk melepas maupun menghubungkan beban dengan sumber tergantung dari kecepatan PMT tersebut. Waktu antara *tripping coil* mulai dienergized sampai kontak CB bergerak disebut waktu buka (*Opening time*). Waktu antara kontak CB bergerak sampai busur api padam disebut waktu busur api (*Arcing time*). Jumlah waktu dari *tripping coil* mulai diberi energi sampai busur api padam disebut total waktu buka (Total break time).

Pada waktu menghubungkan atau pemutusan arus beban dan arus gangguan akan terjadi 'Tegangan *Recovery*' yaitu suatu fenomena tegangan lebih dan busur api yang terjadi saat pemutusan arus beban atau arus gangguan yang disebabkan oleh nilai *Power Faktor* dari arus beban atau gangguan tersebut. Hal ini sangat mempengaruhi kemampuan membersihkan dengan baik dari Circuit Breaker.

2.2.2. Syarat – syarat Pemutus Tenaga (PMT) 150 kV

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu PMT untuk proteksi saluran tenaga listrik adalah sebagai berikut:

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus-menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.

3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

Pemutus tenaga (PMT) yang dikaji berada di lokasi *switch yard* Gardu Induk 150 Kv Pantai Indah Kapuk. PMT yang digunakan di Gardu Induk 150 kV Pantai Indah Kapuk pada jaringan 150 kV merupakan PMT tegangan tinggi (*High Voltage Circuit Breaker*) dengan range tegangan 35 s.d 245 kV (berdasarkan SPLN 1.1995 – 3.5). Dengan range tersebut, diharapkan PMT ini mampu menjadi sebuah proteksi / pengaman yang baik.

2.2.3. Keunggulan PMT Gas SF_6



Gambar 2.7 Pemutus Tenaga Gas SF_6

PMT gas SF_6 ini dapat digunakan untuk memutus arus sampai 40 kA dan pada rangkaian bertegangan sampai 765 kV.

Sementara itu, keunggulan PMT gas SF_6 dilihat dari keuntungan sifat-sifat dari gas SF_6 di atas dibandingkan dengan PMT jenis lain untuk mengamankan Gardu Induk dan jaringan yaitu :

1. Hanya memerlukan energi yang rendah untuk mengoperasikan mekanismenya. Pada prinsipnya, SF_6 sebagai pemadam busur api tidak memerlukan energy untuk mengkompresikannya, namun semata-mata karena pengaruh panas busur api yang terjadi.
2. Tekanan SF_6 sebagai pemadam busur api maupun sebagai pengisolasi dapat dengan mudah dideteksi.
3. Penguraian pada waktu pemadaman maupun pembentukan kembali busur api setelah pemadaman adalah menyeluruh.
4. Mampu mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, setelah arus bunga api listrik melalui titik nol.
5. Relatif mudah terionisasi sehingga plasmanya pada PMT konduktivitas tetap rendah dibandingkan pada keadaan dingin. Hal ini mengurangi kemungkinan busur api tidak stabil dengan demikian ada pemotongan arus dan menimbulkan tegangan antar kontak.
6. Karakteristik gas SF_6 adalah elektro negatif sehingga penguraiannya menjadikan dielektriknya naik secara bertahap.
7. Transien frekuensi yang tinggi akan naik selama operasi pemutusan dan dengan adanya hal ini busur api akan dipadamkan pada saat nilai arusnya rendah.

2.2.4. Prinsip Kerja PMT 150 kV dengan media Gas SF_6

1. Pada proses pembukaan, tabung kontak bergerak yang terhubung dengan kontak tetap bawah meninggalkan kontak tetap atas. Pertama kali silinder bergerak akan terpisah dengan jari-jari kontak tetap kemudian jari-jari busur akan terpisah dari batang busur dan akhirnya ujung busur akan terpisah dengan batang busur. Pada saat ujung busur terpisah dengan batang busur akan terjadi loncatan api yang segera dipadamkan oleh hampasan gas SF_6
2. Pada Proses Penutupan, tabung kontak bergerak yang berhubungan dengan kontak tetap bawah bergerak ke arah bagian-bagian kontak tetap dan terminal atas sehingga kontak tetap dan terminal atas (upper terminal) ke terminal bawah (lower terminal).

2.3. Sifat - Sifat Gas SF_6

Sifat - sifat gas SF_6 murni ialah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Adapun sifat – sifat gas SF_6 adalah :

1. Sifat Fisika Gas SF_6

Pada temperatur $20^{\circ}C$ dan tekanan 1 Atmosfir gas SF_6 ini mempunyai berat jenis $6,16 \text{ kg/cm}^3$ sedangkan berat jenis udara hanya $1,29 \text{ kg/cm}^3$ berarti hal ini mencapai 4 kali berat jenis udara, oleh karena itu gas SF_6 ini termasuk kategori gas berat. Pada temperature

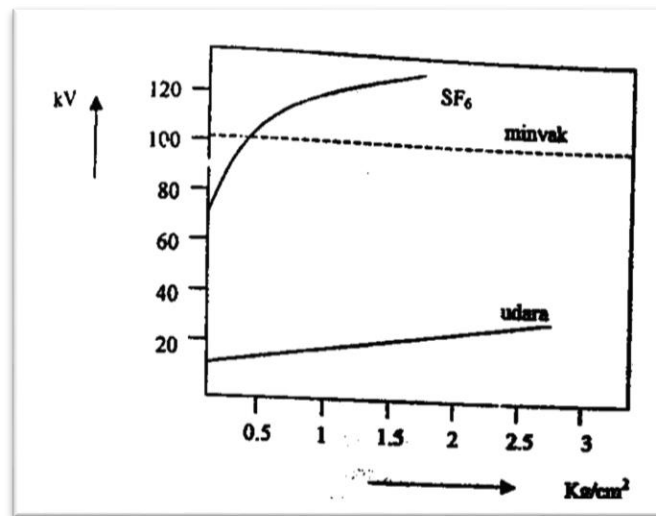
yang rendah yaitu $50,7^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 2,3 bar gas SF_6 akan mencair. Bentuk fisik dari gas SF_6 akan berubah sesuai perubahan suhu dan tekanannya.

2. Sifat kimia gas SF_6

Pada temperatur yang tinggi sekitar 500°C gas SF_6 dapat terurai menjadi SF_5 serta sedikit campuran dari S, F, S_2 . Bahan-bahan uraian tersebut jika bercampur dengan uap air akan menyebabkan korosi atau karat pada bahan gelas dan logam, dimana bahan-bahan ini digunakan sebagai penyekat pada gardu induk.

3. Kekuatan dielektrik gas SF_6

Kekuatan dielektrik gas SF_6 merupakan hal yang sangat penting dalam pemutusan bunga api pada saat terjadi gangguan. Pada tekanan gas yang sama, gas SF_6 mempunyai kekuatan dielektrik yang beberapa kali lebih besar dari media lainnya. Hal ini dapat kita lihat pd gambar 2.6 yang merupakan kekuatan dielektrik dengan tekanan.



Gambar 2.8 Kekuatan dielektrik terhadap tekanan

Dari gambar terlihat bahwa pada tekanan atmosfer, kekuatan dielektrik gas SF_6 sekitar 30% lebih kecil bila dibandingkan kekuatan dielektrik dari minyak. Tetapi, sejalan dengan bertambahnya tekanan akan menyebabkan bertambah atau naik dengan cepat kekuatan dielektrik dari gas SF_6 sedangkan kekuatan dielektrik dari minyak tetap.

Pada tekanan sekitar 0,65 kg/cm² kekuatan dielektrik dari gas SF_6 dan minyak mencapai titik yang sama. Namun kemudian dengan bertambahnya tekanan mencapai 1,225 kg/cm² kekuatan dielektrik dari gas SF_6 melaju ke tingkat yang lebih tinggi yaitu 15% dari kekuatan dielektrik minyak.