

BAB II

KONSEP DASAR GIS SERTA SIFAT-SIFAT DAN KARAKTERISTIK GAS SF₆

2.1 Pengertian GIS

Gas Insulated Substation (GIS) atau biasa disebut dengan Gardu Gas Terisolasi adalah Gardu Induk yang peralatan-peralatannya berada dalam ruangan yang tertutup rapat (tidak tembus gas). Semua ruangan digabungkan dalam suatu unit mekanis dan ditanahkan, sehingga tidak terjadi bahaya tegangan sentuh dengan gas SF₆ pada tekanan 2 atau 3 atmosfer dan gas ini berfungsi sebagai isolasi pemadaman busur api. *Gas Insulated Substation* (GIS) menggunakan selubung peralatan yang dapat mencegah bahaya terhadap kelangsungan kerja dari *switchgear*.

2.2 Konsep GIS

Salah satu bagian dari sistem tenaga listrik yang sangat penting adalah Gardu Induk (*substation*). Gardu Induk merupakan tempat bertemunya antara saluran transmisi yang bertegangan tinggi dengan saluran transmisi yang bertegangan rendah atau dengan saluran distribusi.

Fungsi utama Gardu Induk adalah untuk menyalurkan daya dari subsistem kelistrikan ke subsistem kelistrikan lainnya, sebagai tempat

pengubah tingkat tegangan dan sebagai tempat pelaksanaan *switching* untuk keperluan pemeliharaan maupun perluasan jaringan kelistrikan. Berdasarkan medium isolasi yang digunakan maka Gardu Induk dapat dibedakan menjadi :

1. Gardu Induk dengan menggunakan medium isolasi udara (*Air Insulated Switchgear*).
2. Gardu Induk dengan menggunakan medium Isolasi gas SF₆ (*Gas Insulated Switchgear atau GIS*).

Dalam pengoperasiannya, Gardu Induk yang menggunakan medium isolasi gas SF₆ lebih menguntungkan bila dibandingkan dengan Gardu Induk konvensional terutama dari segi keandalan, tingkat keekonomisan maupun keamanannya. Selain dinamakan dengan GIS, Gardu Induk yang menggunakan gas SF₆ sebagai medium isolasinya disebut juga dengan *metalclad switchgear*, yaitu *switchgear* yang terletak di dalam tabung-tabung (*enclosure*) yang terbuat dari bahan logam (*aluminium alloy*). Jadi semua peralatan GIS berada di dalam tabung-tabung, dimana tabung-tabung tersebut diisi dengan gas SF₆ yang berfungsi sebagai isolasi.

2.3 Macam-macam Peralatan GIS

Di dalam GIS terdapat peralatan-peralatan listrik yang tidak dapat dipisahkan satu sama lain, karena sambungan-sambungan gas yang kompleks diperlukan antara berbagai komponen. Semua bagian yang berhubungan harus disatukan dengan baik dan permukaan yang disambungkan harus terhubung dengan sempurna.

Adapun peralatan utama GIS pada prinsipnya tidak berbeda dengan switchgear, yaitu terdiri dari :

1. Pemutus Daya /PMT (*Circuit Breaker*)
2. Sakelar Pemisah (*Disconnecting Switch*)
3. Sakelar Pentanahan (*Earthing Switch*)
4. Trafo Arus (*Current Transformer*)
5. Trafo Tegangan (*Voltage Transformer*)
6. Capacitive Voltage Transformator
7. Lightning Arrester (LA)
8. Terminasi

2.3.1 Pemutus Daya (Circuit Breaker)

Pemutus daya adalah suatu peralatan pensakelaran (*Switching*) dan pemutus arus pada keadaan normal dan tidak normal. Dalam keadaan normal, pemutus daya digunakan untuk melayani penyaluran daya listrik. Sedangkan dalam keadaan tidak normal, pemutus daya bekerja untuk memutuskan penyaluran daya listrik atas perintah relay yang memberikan perintah trip kepada pemutus daya untuk membuka.

Pemutus daya pada GIS ditempatkan di dalam tabung-tabung (enclosure) yang berisi SF₆. Kegunaan gas SF₆ selain sebagai media isolasi juga digunakan sebagai pemadam busur api listrik yang terjadi pada saat pemutus daya bekerja untuk memutuskan penyaluran daya listrik.

PMT adalah sebuah peralatan switching mekanik yang memiliki kemampuan untuk menyambung, menyalurkan dan memutus arus pada kondisi normal dan abnormal sesuai dengan spesifikasi waktu dan kemampuan arus (IEEE C37.100-1992).



Gambar 2.1: Kompartemen Pemutus Tenaga (model busbar 1 enclosure – 1 phase)

2.3.2 Saklar Pemisah (Disconnecting Switch)

Saklar pemisah berfungsi untuk memisahkan suatu bagian dari suatu sistem terhadap bagian yang hidup pada keadaan tanpa beban. Saklar pemisah ini tidak memiliki kapasitas pemutus arus atau menghubungkan arus. Karena itulah saklar pemisah tidak boleh dioperasikan dalam keadaan berbeban.

Jika pemutus daya digunakan untuk memutuskan arus pada keadaan normal, maka saklar pemisah dipergunakan sebagai tambahannya. Pada saat pembukaan rangkaian, yang pertama dibuka adalah pemutus daya, setelah itu baru saklar pemisah. Dan pada penutupan, yang pertama ditutup adalah saklar pemisah setelah itu baru pemutus daya. Dengan demikian, saklar

pemisah hanya dapat dibuka jika pemutus daya dibuka dan pemutus daya tidak dapat ditutup jika saklar pemisah tidak dalam keadaan tertutup

2.3.3 Saklar Pentanahan (Earthing Switch)

Saklar pentanahan berfungsi untuk membuang tegangan saluran terhadap tanah. Saklar pentanahan terhubung diantara saluran penghantar dan bumi. Dalam keadaan operasi normal, saklar pentanahan harus terbuka. Bila saluran dipisahkan maka saklar pentanahan harus ditutup untuk membuang tegangan yang tertinggal disaluran. Sebab meskipun saluran telah dibuka, masih terdapat tegangan pada saluran sebagai akibat dari efek kapasitansi atau perawatan, tegangan harus dibuang ke bumi melalui penutupan saklar pentanahan.

PMS/PMS tanah adalah peralatan switching mekanis yang digunakan untuk mengubah koneksi pada sebuah rangkaian tenaga atau untuk mengisolasi rangkaian/peralatan dari sumber daya dan/atau sumber daya ke tanah (IEEE C37.100-1992).



..... Earthing Switch with Motor Operating Box

Gambar 2.2: Kompartemen PMS tanah(model busbar 1 enclosure – 1 phase)

2.3.4 Trafo Arus (Current Transformer)

Trafo arus berfungsi untuk memperkecil besaran arus yang besar pada tegangan yang tinggi menjadi arus yang kecil pada tegangan yang rendah. Perubahan harga arus yang kecil pada tegangan yang rendah ini dipergunakan untuk keperluan penunjukan dari arus, kWh meter, pengukuran jarak jauh dan relai-relai proteksi.

CT adalah trafo pengukuran yang sisi primernya dihubungkan seri dengan konduktor pembawa arus yang akan diukur, dimana arus sekundernya proporsional terhadap arus sisi primernya (IEEE C57.13-1993) dan IEC 60044-2-2003.



Gambar 2.3: Kompartemen Trafo Arus (model busbar 1 enclosure – 1 phase)

2.3.5 Trafo Tegangan (Voltage Transformator)

Trafo tegangan berfungsi untuk menurunkan tegangan sistem pada tegangan yang aman bagi operator untuk keperluan energi, relai dan sinkronisasi.

VT adalah trafo pengukuran yang sisi primernya dihubungkan parallel dengan konduktor yang akan diukur tegangannya, dimana tegangan sekundernya proporsional terhadap tegangan sisi primernya (IEC 60044-2-2003) dan IEEE C57.13-1993.



Gambar 2.4: Kompartemen Trafo tegangan (model busbar 1 enclosure – 1 phase)

2.3.6 Capacitive Voltage Transformer (CVT)

CVT adalah trafo tegangan yang menggunakan kapasitor pembagi tegangan supaya sisi tegangan sekunder unit elektromagnetik proporsional dan sefasa dengan tegangan primer pada kapasitor pembagi tegangan (IEEE C57.93.1-1999).

2.3.7 Lightning Arrester (LA)

LA adalah peralatan yang berfungsi mengamankan peralatan GIS dari tegangan lebih akibat surja petir atau surja hubung.



Gambar 2.5: Kompartemen LA (model busbar 1 enclosure – 1 phase)

2.3.8 Terminasi

Terminasi adalah bagian yang terpasang sebagai interface elektrik dan mekanik antar 2 sistem isolasi (IEEE 1300-1996). Terminasi pada GIS terdiri dari terminasi sealing end (konduktor GIS-kabel), terminasi outdoor bushing (kabel-overhead line), terminasi outdoor bushing (konduktor GIS-overhead line) dan terminasi trafo (konduktor GIS-bushing trafo).



Gambar 2.6: Terminasi pada Sealing End Cable (model busbar 1 enclosure – 1 phase)



Gambar 2.7: Terminasi/outdoor bushing (model busbar 1 *enclosure* – 1 phase)

(a) Terminasi/outdoor bushing dari kompartemen-overhead line

(b) Terminasi/outdoor bushing dari sealing end-overhead line

2.4 KARAKTERISTIK GAS SF₆ (SULPHUR HEXAFLUORIDA)

Gas SF₆ (*sulphur hexafluorida*) murni adalah gas berat yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa dan tidak beracun. Secara kimia stabil dan tidak mudah terbakar. Gas SF₆ didapatkan melalui sintesis langsung *fluor* dan mencairkan *sulphur*.

Oleh karena gas SF₆ yang didapatkan masih mengandung *fluoride* lainnya, maka harus dimurnikan lagi. Selanjutnya dicairkan melalui pemampatan (*compression*) untuk mengeliminasi elemen-elemen yang tidak dapat dipadatkan (*non condensable*) seperti *Oksigen*, *Nitrogen* dan *Carbon Tetrafluorida*.

Hingga saat ini sebanyak 80% gas SF₆ yang diproduksi di seluruh dunia dipakai sebagai media isolasi dalam sistem kelistrikan. Hal ini disebabkan oleh sifat-sifat gas SF₆ sebagai berikut.

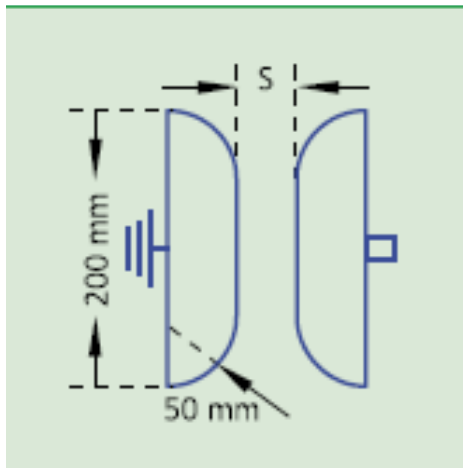
- Penghantar panas (*thermal conductivity*) yang bersifat dapat mendisipasikan/menyerap panas yang timbul pada peralatan.
- Isolasi yang sangat baik (*excellent insulating*).
- Mampu memadamkan busur api (arc).
- Viskositas rendah.
- Stabil, tidak mudah bereaksi.

Sifat dielektrik yang bagus pada SF₆ karena luasnya penampang molekul SF₆ dan sifat *electron affinity* (*electronegativity*) yang besar dari atom fluor. Dengan adanya sifat ini maka SF₆ mampu menangkap elektron bebas (sebagai pembawa muatan), menyerap energinya, dan menurunkan temperatur busur api. Hal ini dinyatakan dengan persamaan berikut:

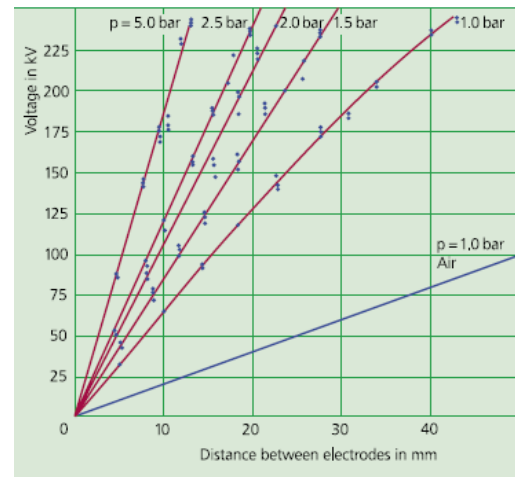


Energi yang diperlukan reaksi pertama adalah sebesar 0,05 eV untuk energi elektron sebesar 0,1 eV, sedangkan untuk reaksi kedua adalah sebesar 0,1 eV. Setelah proses pemadaman busur api, sebagian kecil dari SF₆ akan tetap menjadi *decomposition product* (hasil penguraian) sedangkan sebagian besar akan kembali menjadi SF₆. Kekuatan dielektrik SF₆ adalah 2,3 kali udara.

Pengujian terhadap tegangan tembus AC dengan frekuensi 50 Hz di bawah medan listrik homogen yang dibentuk oleh 2 elektroda dengan susunan seperti diperlihatkan pada Gambar 2.8 (a) menunjukkan bahwa kekuatan dielektrik SF_6 merupakan fungsi dari tekanan gas SF_6 itu sendiri.



(a)



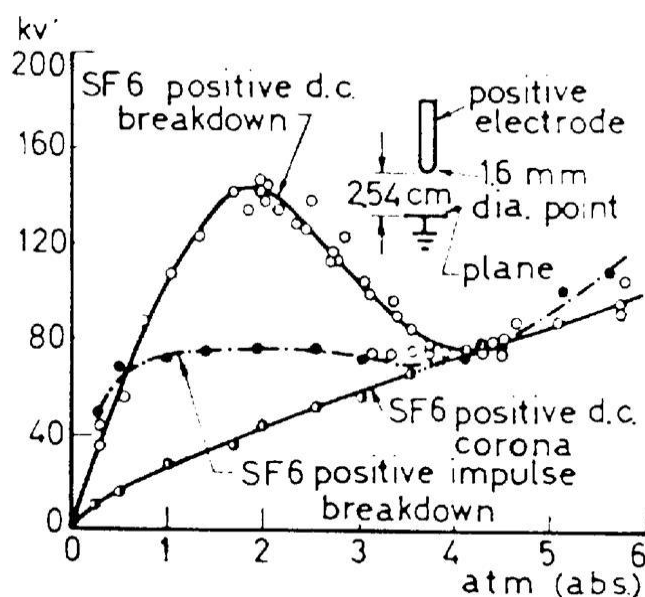
(b)

Gambar 2.8: Tegangan tembus AC gas SF_6 dalam berbagai tekanan di bawah medan listrik homogen

(a) susunan pengujian

(b) sebagai fungsi dari jarak antar elektroda

Sedangkan dalam medan listrik tidak homogen, misalnya pada susunan jarum-pelat, maka terjadi perubahan karakteristik sebagaimana diperlihatkan pada Gambar.



Gambar 2.9: Karakteristik dielektrik SF₆ dalam medan listrik tidak homogen

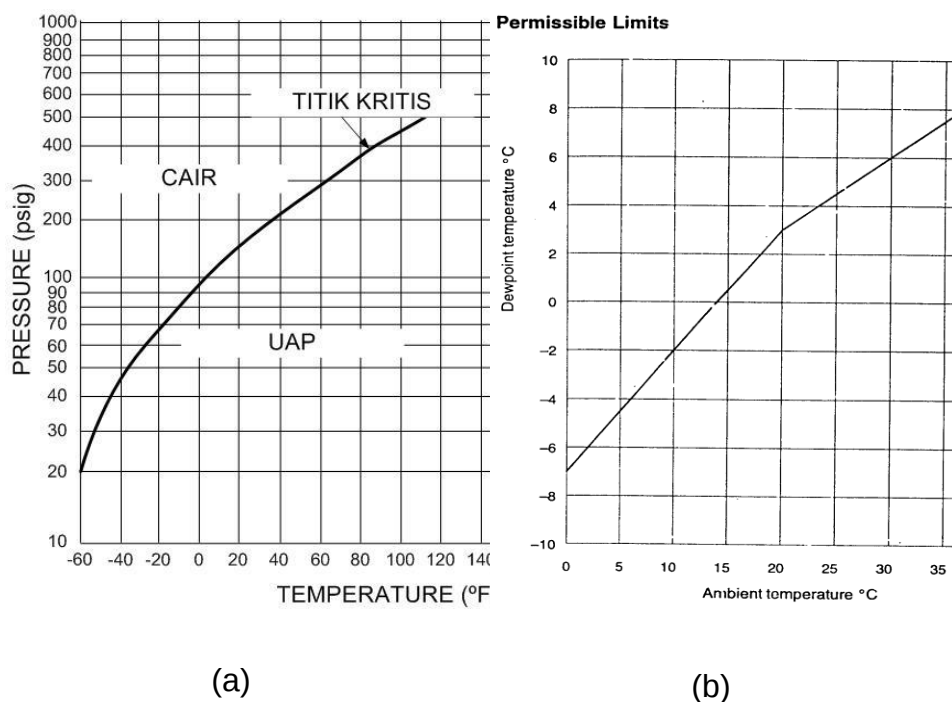
Gambar memperlihatkan karakteristik dielektrik SF₆ dalam medan listrik tidak homogen pada rentang tekanan 0-6 atm absolut. Grafik paling atas menggambarkan besar tegangan positif DC sampai SF₆ breakdown, grafik tengah menggambarkan besar tegangan positif impulse sampai SF₆ breakdown, sedangkan grafik paling bawah menggambarkan besar tegangan positif DC sampai terbentuk corona.

Gas Sulfur Heksafluorida (SF₆) murni adalah senyawa yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan tidak beracun serta memiliki kerapatan 5 (lima) kali lipat dari udara. Pada temperatur dan tekanan kamar senyawa ini berwujud gas.

Meskipun dinyatakan tidak beracun, SF₆ dapat menggantikan udara sehingga mengakibatkan kurangnya kadar oksigen yang dapat dihisap oleh makhluk hidup. SF₆ memiliki *Global Warming Potential* (GWP) 23.900 kali dari

GWP CO₂ dan mampu bertahan di atmosfer bumi selama 3500 tahun. Untuk itu diperlukan penanganan yang baik pada gas SF₆ yang sudah tidak terpakai lagi. Namun demikian, SF₆ tidak menyebabkan berkurangnya lapisan ozon karena tidak mengandung chlorine.

Hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan gas SF₆ sebagai media isolasi selain kualitasnya adalah tekanan kerja gas SF₆. Hal ini disebabkan bahwa pada temperatur dan tekanan tertentu SF₆ akan berubah wujud dari gas menjadi cair (lihat Gambar 2. (a)). Pada tekanan 1 atmosfer SF₆ mencair pada suhu -63,8°C. Jika hal ini terjadi maka tekanan gas yang tersisa menjadi lebih rendah daripada tekanan kerja yang diinginkan. Sedangkan untuk tiap tekanan kerjanya, terdapat titik kritis untuk dew point (titik embun) pada temperatur tertentu seperti diperlihatkan pada Gambar 2. (b).



Gambar 2.10: Titik Kritis cair ke gas untuk SF₆ dan batas dew point.

(a) Titik kritis dari cair ke gas untuk SF₆.

Catatan: 100 psig = 6.894757 bar.

(b) Batas dew point untuk berbagai temperatur kerja pada tekanan SF₆ 5,5 bar

SF₆ mempunyai sifat kimia: tidak mudah terbakar, stabil dan inert (tidak mudah bereaksi) dengan metal, plastik, dan material lain yang biasanya digunakan di dalam circuit breaker tegangan tinggi hingga suhu 150 °C. Pada suhu tinggi (400 °C hingga 600 °C), pada saat terjadi spark, ikatan gas SF₆ mulai pecah.

SF₆ yang dipakai untuk media isolasi memiliki persyaratan yang dicantumkan dalam IEC 60376-2005 dengan tingkat kemurnian minimum 99,70%.

Tabel 2.1 Kualitas Spesifikasi SF₆ sebagai media isolasi GIS

Kandungan	Spesifikasi	Metode Analisis (Hanya untuk Indikasi, bukan lebih mendalam)	Ketelitian
Udara	2 g/kg ¹)	Metode infrared absorption	35 mg/kg
		Metode Gas-	3-10 mg/kg

		chromatographic	
		Metode Density	10 mg/kg
CF ₄	2 400 mg/kg ²⁾	Metode Gas-chromatographic	9 mg/kg
H ₂ O	25 mg/kg ³⁾	Metode Gravimetric	0.5 mg/kg ⁵⁾
		Metode Electrolytic	2-15 mg/kg
		Metode Dew point	1 °C
Mineral Oil	10 mg/kg	Metode Photometric	< 2 mg/kg
		Metode Gravimetric	0,5 mg/kg ⁵⁾
Total keasaman dalam HF	1 mg/kg ⁴⁾	Titration	0,2 mg/kg

Catatan :

- 1) 2 g/kg sama dengan 1% dari volume di bawah kondisi ambient (100 kPa dan 20°C).
- 2) 2 400 mg/kg sama dengan 4 000 µl/l di bawah kondisi ambient (100 kPa dan 20°C).
- 3) 25 mg/kg (25 mg/kg) sama dengan 200 µl/l dan dew point pada -36 °C, diukur pada kondisi ambien (100 kPa dan 20 °C).

- 4) 1 mg/kg sama dengan 7,3 $\mu\text{l/l}$ di bawah kondisi ambien.
- 5) Tergantung pada ukuran contoh.

Spesifikasi dari pabrikan SF_6 adalah seperti tercantum pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kualitas SF_6 sebagai media isolasi GIS

Parameter Kimiawi	Nilai	Besaran
Sulfur hexafluorida	$\geq 99,90$	%
Udara	≤ 500	ppmw*
CF_4	≤ 500	ppmw
Asam (HF)	$\leq 0,3$	ppmw
Uap air	≤ 15	ppmv**
Minyak mineral	≤ 10	ppmw
Fluorida penyebab hydrolisis (HF)	≤ 1	ppmw

(* ppmw : part per million weight)

(** ppmv : part per million volume)

2.5 Kebocoran Gas SF₆

Kebocoran gas SF₆ akan menyebabkan penurunan tekanan pada kompartemen yang berdampak langsung pada penurunan kekuatan isolasi. Pada umumnya, setiap kompartemen telah dilengkapi alat pengukur tekanan gas yang difungsikan untuk mengukur tekanan gas dan memberikan sinyal alarm atau trip/blok sebagai fungsi proteksi. Besarnya tekanan gas setting alarm dan trip/blok disesuaikan dengan *manual book* masing-masing peralatan.

Kebocoran gas SF₆ pada umumnya terjadi pada sambungan antar selubung (*enclosure*) kompartemen GIS, sistem pengukuran tekanan gas SF₆ atau melalui katup inlet/oulet sebagai dampak dari menurunnya kualitas *seal* atau mengendurnya baut mur dan baut penghubung kompartemen.

Untuk menghitung besarnya laju kebocoran gas SF₆, informasi yang perlu dicatat adalah tanggal pengisian, tekanan gas dan suhu lingkungan sebelum dan sesudah pengisian gas.

2.6 Purity / kemurnian Gas SF₆

Purity menunjukkan persentase kadar kemurnian gas SF₆ pada setiap kompartemen. Dalam kompartemen GIS kadar kemurnian gas SF₆ tidak mungkin mencapai 100%, hal ini disebabkan oleh adanya kontaminan yang dapat bersumber dari:

- Adanya udara tersisa pada pipa, valve atau kompartemen setelah evakuasi gas, dan dari kebocoran pada valve pada saat proses penanganan gas SF_6 (proses pengisian dan pengosongan gas dalam kompartemen) yang tidak sempurna.
- Adanya kebocoran kompartemen dapat menyebabkan uap air berdifusi (beralih) kedalam kompartemen dari luar jika tekanan sebagian uap air diluar kompartemen lebih tinggi daripada dalam kompartemen. Jalur utama kebocoran adalah sifat penyerapan kompartemen, seal bagian yang bergerak secara mekanis, dan sistem seal. Difusi melalui bagian logam dan material polimer dapat diabaikan karena koefisien difusi uap air material ini sangat kecil.
- Berbagai macam gas dan uap seperti air dan pembersih mungkin terjebak di permukaan bagian dalam dari kompartemen atau oleh material dalam jumlah besar sebelum peralatan dirakit. Material polimer memungkinkan menjadi sumber utama moisture (uap air) didalam sistem. Hasil pengambilan sample peralatan dengan absorbent menunjukkan bahwa tekanan partial uap air didalam gas dalam orde 100 Pa yang terkait dengan titik embun sekitar $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada tekanan operasi. Absorbent yang tidak ditangani dengan baik dapat mengandung moisture dan gas by product SF_6 , yang mungkin dilepaskan pada saat evakuasi atau kenaikan temperature.

- Debu dan partikel yang dihasilkan oleh proses mekanis, partikel debu logam dapat dihasilkan oleh gesekan mekanis permukaan logam. Bila peralatan didesain dengan tepat, partikel ini biasanya terkumpul dalam tempat yang tidak berpengaruh pada kekuatan sistem isolasi. Jika partikel ini terjatuh kedalam area kuat medan listrik yang tinggi seperti sambungan isolasi, maka dapat menyebabkan tracking (bekas) dipermukaan isolator dan flashover. Oleh karena itu, dalam penanganan gas harus diperhatikan untuk menghilangkan partikel debu dengan filter yang sesuai.
- Penguraian gas SF₆ karena electric discharge. Gas SF₆ dapat terurai dan membentuk produk turunannya karena terjadi electric discharge. Untuk lebih jelasnya dibahas dalam sub bab 3.