

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu hal yang paling penting dalam kehidupan manusia. Energi listrik dibutuhkan dalam beberapa sektor, yaitu sektor rumah tangga, industri, bisnis, sosial, gedung kantor pemerintah, dan penerangan jalan umum. Sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga komponen, yaitu sistem pembangkit, transmisi, dan distribusi. Sistem di saluran transmisi meliputi *tower* dan gardu induk. Gardu induk mempunyai peranan penting, dalam pengoperasiannya tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran (transmisi) secara keseluruhan. Gardu Induk memiliki bay yang berarti nama tujuan dan peralatan utama yang terpasang, seperti contoh bay penghantar, bay trafo, bay kopel dan sebagainya yang masing-masing di dalamnya memiliki peralatan listrik sangat penting, salah satunya PMT (Surya dkk, 2022).

Dalam penyaluran tenaga listrik diperlukan suatu Gardu Induk (GI) yang berfungsi sebagai pengatur tegangan yang disalurkan dari pembangkit ke pusat-pusat beban. Tetapi dalam penyaluran ini sering mengalami berbagai macam gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya kontinuitas penyaluran ke konsumen. Untuk menghindari akibat dari gangguan-gangguan di atas, maka diperlukan sistem pengaman yang baik. Salah satu pengaman yang digunakan adalah pemutus tenaga listrik (PMT), (Ramadhana dalam Harunanda & Fauziah, 2021). *Circuit Breaker* (CB) atau Pemutus Tenaga Listrik (PMT) merupakan sebuah saklar yang dipergunakan untuk menutup, menghubungkan dan memutus arus listrik dalam kondisi normal. Alat ini juga mampu memutus dan mengalirkan beban pada kondisi abnormal seperti *short circuit*. Pemutus Tenaga (PMT) tidak dapat bekerja bila tidak ada media isolator sebagai peredam sumbu api. Salah satu jenis media isolasi yang sering digunakan adalah minyak, PMT jenis ini digunakan untuk meredam sumbu api pada tegangan menengah 6 kV sampai tegangan ekstra tinggi 425 kV (Pambudi & Latifa, 2023).

Isolasi berfungsi sebagai pengaman pada peralatan. Dalam penerapannya pada peralatan, isolasi berfungsi untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar tersebut tidak terjadi loncatan listrik atau busur api. Terjadinya busur api disebabkan oleh adanya pelepasan muatan antar penghantar, yang merupakan bentuk kegagalan isolasi dimana tegangan yang melewati penghantar melebihi batas kekuatan isolasinya. Kegagalan isolasi pada peralatan akan menyebabkan kerusakan peralatan dan gangguan pada sistem kerja (2018).

Keandalan tenaga listrik, keandalan dan keselamatan operasi peralatan sangat bergantung pada kualitas isolasinya. Isolasi berfungsi untuk melindungi bagian konduktif yang bertegangan agar tidak terjadi loncatan listrik atau kegagalan isolasi yang dapat menimbulkan gangguan sistem. Jenis isolasi yang banyak digunakan dalam peralatan tegangan tinggi,



seperti pemutus tenaga (*circuit breaker*), pemisah (*disconnecting switch*), dan *Gas Insulated Switchgear* (GIS), adalah *Sulfur Hexafluoride* (SF_6). Gas ini dikenal memiliki kemampuan dielektrik yang sangat tinggi, stabilitas kimia yang baik, serta sifat non-flammable, sehingga sangat efektif dalam menjaga performa isolasi peralatan Listrik (Setiono, 2017).

Namun, kinerja isolasi SF_6 tidak hanya dipengaruhi oleh sifat kimianya, tetapi juga oleh kondisi tekanan dan temperatur di dalam ruang isolasi. Tekanan gas SF_6 berperan penting dalam menentukan kekuatan dielektriknya. Secara umum, peningkatan tekanan gas akan memperkecil jarak antar molekul, sehingga meningkatkan kemampuan gas untuk menahan tegangan tembus (*breakdown voltage*). Sebaliknya, tekanan yang terlalu rendah dapat menurunkan kemampuan isolasi dan meningkatkan risiko terjadinya pelepasan muatan parsial maupun *flashover*. Oleh karena itu, pemahaman mengenai pengaruh variasi tekanan terhadap kinerja isolasi SF_6 sangat penting, terutama dalam merancang sistem tegangan tinggi yang efisien dan aman (An dkk., 2022).

Seiring perkembangan teknologi dan meningkatnya tuntutan efisiensi energi, sistem isolasi berbasis SF_6 terus dikaji untuk mendapatkan karakteristik optimal dalam berbagai kondisi operasi. Pengujian eksperimental terhadap variasi tekanan gas SF_6 dapat memberikan gambaran nyata mengenai hubungan antara tekanan dan tegangan tembus, sehingga hasilnya dapat dijadikan acuan dalam penentuan spesifikasi desain maupun perawatan peralatan. Selain itu, studi ini juga bermanfaat dalam pengembangan sistem pemantauan kondisi gas (*gas monitoring system*) agar dapat mendeteksi perubahan tekanan yang berpotensi menurunkan kinerja isolasi (An dkk., 2022).

Di sisi lain, isu lingkungan juga menjadi perhatian penting karena SF_6 merupakan gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global (*Global Warming Potential, GWP*) yang sangat tinggi. Oleh sebab itu, penelitian tentang karakteristik isolasi SF_6 dalam berbagai tekanan dapat berkontribusi dalam upaya optimasi penggunaan SF_6 agar tetap memenuhi kebutuhan performa listrik namun dengan jumlah gas yang efisien. Hal ini sejalan dengan arah pengembangan teknologi ramah lingkungan di bidang kelistrikan (*MIT Joint Program, Atmospheric observations in China*, 2019)

Gas sulfur heksafluorida (SF_6) hingga saat ini masih digunakan secara luas sebagai media isolasi pada peralatan tegangan tinggi, seperti gas insulated switchgear dan circuit breaker, karena memiliki kekuatan dielektrik serta kemampuan pemadaman busur listrik yang sangat baik. Keandalan peralatan tersebut sangat bergantung pada kemampuan SF_6 dalam mempertahankan sifat isolasinya terhadap



di. Oleh karena itu, kajian mengenai kinerja isolasi gas SF_6 tetap tinggi untuk mendukung keselamatan, kontinuitas operasi, dan agar listrik tegangan tinggi.

penelitian terdahulu mengenai SF_6 lebih menitikberatkan pada gas ini, mekanisme pemadaman busur, atau analisis produk pelepasan listrik. Penelitian lain hanya mengkaji pengaruh jarak sela elektroda secara terpisah, atau dilakukan pada kondisi

tertentu tanpa variasi parameter yang terstruktur. Akibatnya, data eksperimental yang menunjukkan hubungan langsung antara variasi tekanan gas dan jarak elektroda terhadap kinerja isolasi SF₆ masih relatif terbatas, khususnya pada pengujian tegangan tembus sistem tegangan tinggi.

Penelitian ini memiliki perbedaan utama dengan melakukan pengujian kinerja isolasi gas SF₆ melalui variasi tekanan dan jarak elektroda secara simultan. Pendekatan tersebut memungkinkan analisis yang lebih menyeluruh terhadap pengaruh kedua parameter terhadap nilai tegangan tembus dan perilaku tembus listrik. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap kondisi operasi peralatan sebenarnya, seperti perubahan tekanan akibat kebocoran atau perubahan jarak sela akibat toleransi mekanis dan penuaan peralatan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya melengkapi hasil penelitian sebelumnya, tetapi juga memberikan kontribusi ilmiah yang bermanfaat sebagai dasar evaluasi desain, pengoperasian, dan pemeliharaan peralatan tegangan tinggi.

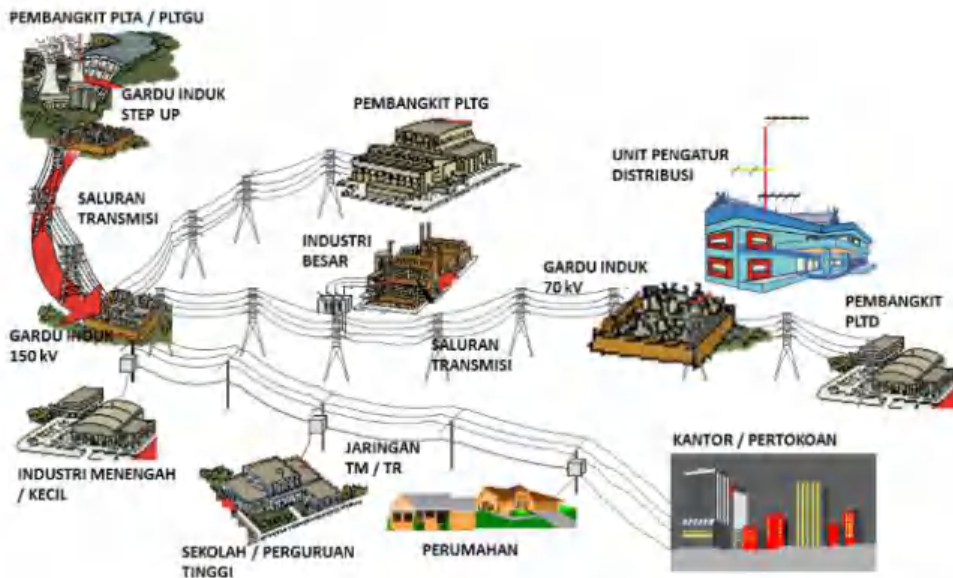
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menguji dan menganalisis kinerja isolasi gas SF₆ terhadap variasi tekanan pada sistem tegangan tinggi. Hasil pengujian diharapkan dapat memberikan data empiris mengenai hubungan antara tekanan gas dan tegangan tembus, serta memberikan dasar ilmiah dalam pengembangan sistem isolasi gas bertekanan tinggi yang lebih efektif, aman, dan efisien. Dengan demikian, penelitian ini memiliki relevansi yang kuat baik dari sisi akademik maupun praktis dalam mendukung keandalan sistem tenaga listrik modern.



1.2 Teori

1.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik adalah suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen berupa pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan berkerja sama untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Pada suatu sistem tenaga listrik, tegangan yang digunakan pada masing-masing komponen dapat berbeda-beda sesuai dengan kepentingannya. Dengan kata lain, setiap komponen pada sistem tenaga listrik mempunyai level tegangan yang berbeda-beda. Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat digambarkan dengan skema di bawah ini (Suripto, 2017).



Gambar 1 Overview Sistem Tenaga Listrik

Sumber: Prihadana (2017)

Pada sistem pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi generator pembangkit yang digunakan, biasanya berkisar antara 11 s/d 24 kV. Untuk pembangkit yang berkapasitas lebih besar biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini dilakukan agar arus yang mengalir tidak terlalu besar. Karena untuk kapasitas daya tertentu, besar arus yang mengalir berbanding terbalik dengan tegangan pada pembangkit biasanya tidak tinggi, karena tegangan generator, jumlah lilitan generator harus lebih banyak sehingga lebih banyak mengakibatkan generator menjadi lebih besar juga dinilai tidak efisien. Pada sistem saluran transmisi biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi. Hal ini karena fungsi pokok saluran transmisi adalah menyalurkan daya, sehingga yang dipentingkan adalah sistem transmisi yang efisien dengan daya dengan efisiensi yang tinggi atau rugi-rugi daya dan turun



tegangannya kecil. Upaya yang dilakukan adalah mempertinggi level tegangan agar arus yang mengalir pada jaringan transmisi lebih kecil. Level tegangan saluran transmisi lebih tinggi dari tegangan yang dihasilkan generator pembangkit. Tegangan saluran transmisi umumnya berkisar antara 70 s/d 500 kV. Untuk menaikkan tegangan dari level pembangkit ke level tegangan saluran transmisi diperlukan transformator penaik tegangan (Suripto, 2017).

Pada jaringan distribusi biasanya menggunakan tegangan yang lebih rendah dari tegangan saluran transmisi. Hal ini karena daya yang didistribusikan oleh masing-masing jaringan distribusi biasanya relatif kecil dibanding dengan daya yang disalurkan saluran transmisi, dan juga menyesuaikan dengan tegangan pelanggan atau pengguna energi listrik. Level tegangan jaringan distribusi yang sering digunakan ada dua macam, yaitu 20 kV untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan 220 V untuk jaringan tegangan rendah (JTR). Dengan demikian diperlukan gardu induk yang berisi trafo penurun tegangan untuk menurunkan tegangan dari saluran transmisi ke tegangan distribusi 20 kV. Diperlukan juga trafo distribusi untuk menurunkan tegangan dari 20 kV ke 220V sesuaitegangan pelanggan (Suripto, 2017).

Level tegangan beban pelanggan menyesuaikan dengan jenis bebannya, misalnya beban industri yang biasanya memerlukan daya yang relatif besar biasanya menggunakan tegangan menengah 20 kV, sedang beban rumah tangga dengan daya yang relatif kecil, biasanya menggunakan tegangan rendah 220 V (Suripto, 2017).

1.2.2 Tegangan Tinggi

Pengetahuan mengenai tegangan tinggi telah mengalami perkembangan yang pesat. Terdapat tiga jenis tegangan tinggi yaitu tegangan tinggi bolak-balik (AC), tegangan tinggi searah (DC), dan tegangan tinggi impuls. Tegangan tinggi digunakan untuk mentransmisikan energi listrik jarak jauh dengan efisiensi yang lebih tinggi, mengurangi rugi daya yang disebabkan oleh arus besar pada penghantar. Sistem ini mencakup beberapa elemen utama seperti pembangkit listrik, transformator tegangan tinggi, saluran transmisi, dan gardu induk.

Berikut klasifikasi tegangan listrik meliputi (Budiyanto,2018):

1. Tegangan Sangat Rendah, tegangan berkisar sampai 50 V. Tegangan Rendah (*Low Voltage* = LV), tegangan rendah berkisar antara 50 volt – 1000 volt (1 kV). Jenis kabel yang digunakan juga harus mampu digunakan pada tegangan 50 volt – 1000 volt (1 kV).
2. Tegangan Menengah (*Medium Voltage*= MV), tegangan menengah/MV berkisar 1000 Volt (1 kV) – 36.000 Volt (36 kV). Jenis kabel yang digunakan juga harus mampu digunakan pada tegangan 1 kV – 36 kV.
3. Tegangan Tinggi (*High Voltage* =HV), Tegangan Tinggi (*High Voltage*) berkisar 36 kV – 150 kV. Jenis kabel yang digunakan juga harus mampu digunakan pada tegangan diatas 36 kV – 150 kV.



4. Tegangan Ekstra Tinggi (*High Extra Voltage* = HEV), tegangan berkisar antara diatas 150 kV – 750 kV. Jenis kabel yang digunakan juga harus mampu digunakan pada tegangan diatas 150 kV – 750 kV.
5. Tegangan Ultra Tinggi (*High Ultra Voltage* = HUV), Tegangan Ultra Tinggi (*High Voltage*) berkisar diatas 750 kV. Jenis kabel yang digunakan juga harus mampu digunakan pada tegangan diatas 750 Kv.

Saluran transmisi biasanya digunakan untuk mengirimkan daya listrik untuk jarak yang relatif jauh. Dari ketiga jenis saluran transmisi, paling banyak digunakan adalah saluran udara, karena lebih ekonomis. Biaya pembangunan saluran udara relatif lebih ringan dibandingkan dengan jenis yang lain, karena menggunakan penghantar yang telanjang atau tidak berisolasi, sedang jenis yang lain harus menggunakan penghantar berisolasi. Penghantar merupakan komponen pokok dari saluran transmisi, sehingga biaya pembangunannya sangat dipengaruhi oleh jenis penghantar yang digunakan. Saluran bawah tanah dan saluran bawah laut hanya digunakan jika saluran udara tidak lagi bisa digunakan, misalnya untuk menyalurkan daya antar pulau. Pada saluran bawah tanah dan saluran bawah laut, kekuatan fisik maupun elektrik isolasi penghantar merupakan hal yang sangat penting, karena bila terjadi kerusakan atau kebocoran akan sangat membahayakan lingkungan di sekitarnya. Sedangkan pada saluran udara, yang penting adalah memenuhi batas ketinggian saluran minimum, sehingga induksi elektromagnetik dan pengaruh medan magnet yang ditimbulkan tidak membahayakan penghuni atau tanaman yang ada di bawah saluran tersebut (Suripto, 2017).

Dari pertimbangan ekonomis, saluran transmisi tegangan bolak-balik atau AC menjadi pilihan utama, karena pada sistem tenaga listrik AC level tegangan dapat dinaikkan atau diturunkan dengan lebih mudah, yaitu cukup menggunakan trafo. Hal ini tidak mudah dilakukan pada sistem listrik arus searah atau DC. Pada sistem DC, untuk menaikkan atau menurunkan tegangan, tegangan DC harus terlebih dahulu diubah menjadi AC, barulah dimasukkan ke trafo, kemudian keluarannya dikembalikan lagi ke DC. Saluran transmisi berfungsi untuk mengirimkan energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban. Pemilihan jenis saluran transmisi sangat ditentukan oleh jumlah energi yang akan disalurkan dan jarak atau panjang saluran transmisinya (Suripto, 2017).

Semakin tinggi level tegangan saluran transmisi tentunya biaya pembangunannya lebih mahal, karena harus menggunakan *tower* yang lebih tinggi dan kekuatan isolasinya juga lebih besar. Demikian juga peralatan-peralatan yang harus digunakan pada gardu induknya (Suripto, 2017).

Saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari pusat-pusat beban, dan biasanya jarak antara pusat pembangkit ke ukup jauh. Jauhnya jarak antara pembangkit dengan beban, enurunan kualitas tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran rgurangi penurunan kualitas tegangan dan rugi-rugi daya di ransmisi, maka dalam penyaluran energi listrik digunakan ggunaan tegangan tinggi pada saluran transmisi mempunyai na untuk penyaluran daya yang sama arus yang dialirkan



menjadi berkurang. Kemudian penggunaan bahan tembaga pada konduktor akan berkurang karena luas penampang konduktor yang digunakan berkurang (Azis, 2019).

Tegangan tinggi identik dengan isolasi peralatan isolasi, yakni kemampuan suatu bahan menahan kuat medan listrik. Jika suatu penghantar diberi tegangan maka daerah sekitar bahan akan timbul medan listrik. Medan listrik memiliki kuat medan listrik (V/cm) yang merupakan stress pada isolasi. Sementara media isolasi memiliki kekuatan dielektrik (kd), kemampuan dari isolasi untuk menahan terpaan medan listrik (E). Semakin besar kuat medan listrik yang menghantam isolasi, maka harus semakin besar pula kekuatan dielektrik isolasi tersebut (Tobing, 2017).

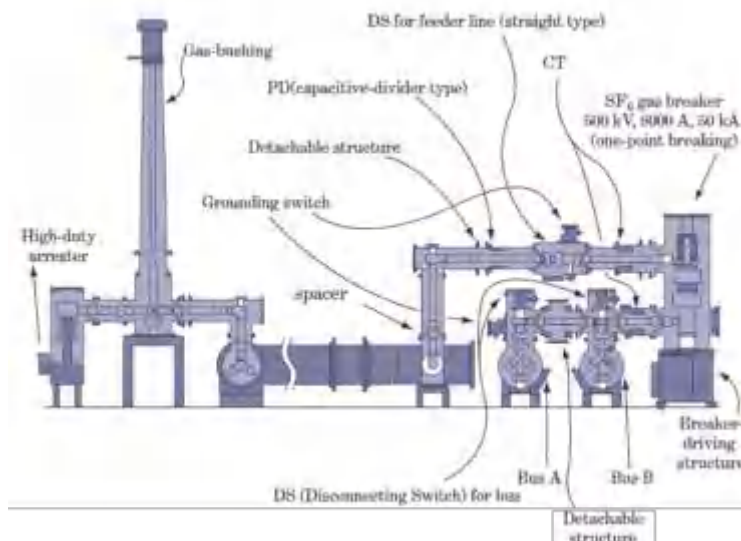
Tegangan tinggi dapat mengalami pelepasan muatan (*discharge*) atau kegagalan karena adanya tekanan pada dielektrik saat isolasi sehingga menyebabkan hilangnya tegangan sekaligus mengalirkan arus. Terdapat dua jenis pelepasan muatan pada tegangan tinggi, yaitu percikan api (*sparkover*) yang terjadi pada udara atau gas yang tidak menyangkut permukaan isolasi dan lompatan api (*flashover*) yaitu percikan atau busur api di sepanjang permukaan isolasi. Kegagalan ini menandakan telah terjadinya tembus listrik (Tobing, 2017).

1.2.3 Gas Insulated Switchgear (GIS)

Pembangkit yang ada di Indonesia sebagian besar sudah mulai melakukan penggantian yang awalnya menggunakan *switchyard* lalu beralih menggunakan *gas insulated switchgear* demi meningkatkan kualitas pelayanan kepada konsumen. Untuk menjaga mutu *gas insulated switchgear* agar beroperasi sebagaimana mestinya, maka dilakukan kegiatan pengecekan secara teratur. Pengecekan pada *gas insulated switchgear* bisa berupa pengecekan kondisi eksisting dan keandalan. Pengecekan kondisi eksisting *gas insulated switchgear* yaitu melihat perubahan yang terjadi pada *gas insulated switchgear* mulai dari awal pemasangan hingga saat ini. Keandalan *gas insulated switchgear* yaitu mengetahui kinerja pada saat terjadi gangguan atau keadaan abnormal sesuai dengan fungsinya. Setelah melakukan kegiatan pengecekan dapat disimpulkan *gas insulated switchgear* layak untuk beroperasi atau tidak (Duanaputri dkk, 2021).

Gas insulated switchgear atau *gas insulated substation* biasanya dapat disingkat dengan GIS, merupakan sebuah sistem penghubung dan pemutus jaringan listrik yang dilindungi oleh gas SF₆ bertekanan sebagai material isolasi elektrik dan pemadaman busur api. GIS merupakan salah satu klasifikasi gardu induk yang memakai isolasi gas. Berdasarkan lokasi peletakkannya, GIS terbagi menjadi dua yaitu didalam ruangan (*indoor*) dan diluar ruangan (*outdoor*). GIS biasanya ditempatkan pada daerah perkotaan karena luas wilayah yang terpakai lebih kecil dari pada gardu yang konvensional (Duanaputri dkk, 2021). *Gas insulated switchgear* merupakan sebuah gardu yang seluruh komponennya berada dalam ruangan yang dilindungi dengan gas SF₆ sebagai media isolasinya. GIS ini biasanya digunakan di daerah perkotaan yang terbatas karena bentuk GIS yang lebih *compact* dan tidak membutuhkan lahan yang besar seperti AIS (*Air Insulated Switchgear*) (Duanaputri dkk, 2022).





Gambar 2 Konstruksi Gas Insulated Switchgear
 Sumber: *HowElectrical.com* (2025)

Keandalan gas insulated switchgear adalah suatu kemampuan mengamankan dalam kondisi abnormal untuk mencegah terjadinya kerusakan yang lebih parah dan meluas.

1.2.4 Bahan Isolasi

Bahan Isolasi adalah sifat bahan yang berfungsi dapat memisahkan secara elektrik dua buah atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, lompatan api (*flashover*), ataupun percikan api (*sparkover*). Isolasi mempunyai pengertian memisahkan daerah yang bertegangan dengan daerah yang tidak bertegangan. Kemampuan bahan isolasi untuk menahan tegangan disebut kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dari bahan isolasi sangat penting dalam hal menentukan kualitas isolator yang nantinya akan mendukung keseluruhan sistem tenaga listrik. Semakin tinggi kekuatan dielektrik bahan isolasi, semakin baik kualitasnya. Bahan isolasi yang digunakan pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa golongan yaitu: padat, cair, dan hampa (Naidu & Kamaraju, 2009).

Isolasi berfungsi sebagai pengaman pada peralatan. Dalam penerapannya pada peralatan, isolasi berfungsi untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik sehingga antara penghantar tersebut tidak terjadi loncatan listrik. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya pelepasan muatan yang merupakan bentuk kegagalan isolasi dimana tegangan yang melebihi batas kekuatan isolasinya. Kegagalan isolasi pada peralatan dapat menyebabkan kerusakan peralatan dan gangguan pada sistem kerja (Naidu & Kamaraju, 2018).



Penggunaan isolator pada sistem tegangan tinggi menjadi semakin penting seiring meningkatnya kebutuhan energi listrik dan pembangunan jaringan transmisi jarak jauh. Isolator memastikan tidak terjadinya kegagalan dielektrik yang dapat menyebabkan gangguan sistem, seperti hubung singkat atau arus bocor yang berbahaya. Selain itu, dengan perkembangan teknologi, material isolator terus ditingkatkan untuk memenuhi tuntutan kinerja yang lebih tinggi, terutama di lingkungan yang sangat tercemar atau dalam kondisi ekstrem lainnya. Pemilihan isolator yang tepat tidak hanya berpengaruh pada keandalan sistem tetapi juga pada efisiensi dan umur operasional infrastruktur kelistrikan (Prasetyo & Murdiya, 2018).

Isolasi terdiri dari 3 jenis, yaitu isolasi padat, isolasi cair, dan isolasi gas. Dari ketiga jenis isolasi, isolasi padat memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi dibandingkan isolasi cair dan gas. Namun dalam penggunaannya pada saat terjadi tegangan tembus dan setelah tegangan tembus isolasi padat tidak lebih baik dari isolasi cair dan gas. Isolasi padat akan rusak secara permanen sedangkan pada isolasi gas akan kembali ke sifatnya semula. Hal ini menyebabkan perlu dilakukannya penelitian untuk mencari karakteristik dielektrik isolasi yang lebih baik dengan ke efisienan dalam penggunaan yang tinggi sehingga dapat meningkatkan kualitas kerja dari sistem peralatan dan membuat peralatan menjadi lebih aman dan tahan lama selama sistem beroperasi atau bekerja (Prasetyo & Murdiya, 2018).

1.2.5 Kekuatan Dielektrik

Kekuatan dielektrik adalah kemampuan daya hantar arus yang sangat kecil atau bahkan hampir tidak ada yang dimiliki suatu bahan. Pada bahan dielektrik tidak terdapat elektron-elektron bebas diseluruh bahan akibat pengaruh medan listrik, dalam bahan dielektrik semua elektron-elektron terikat dengan kuat pada intinya sehingga terbentuk suatu struktur tegangan benda padat, atau dalam hal cairan atau gas, tiap bagian struktur yang saling mengikat membuat tiap aliran massa tidak merupakan perpindahan dari muatan. Tiap elektron mempunyai energi ikat, yaitu energi yang mengikat elektron terhadap inti atom, agar elektron tetap berada pada lintasannya. Dalam keadaan normal jumlah proton sama dengan jumlah elektron, sehingga satu atom dalam keadaan normal akan bersifat netral. Karena suatu proses, dimisalkan terjadi benturan antara elektron dengan suatu partikel dari luar. Jika energi kinetik partikel ketika membentur elektron lebih besar dari pada energi ikat elektron maka elektron akan keluar dari lintasannya menjadi elektron bebas, sehingga partikel yang tersisa dalam atom tinggal berupa dua proton, dua neutron dan satu elektron. Karena muatan positif lebih banyak dari pada muatan negatif, maka total muatan atom sekarang menjadi positif (Bonggas, 2012).



Besarnya rugi-rugi dielektrik gas terhitung sangat kecil pada waktu kekuatan medan nilai saat tumbukan ionisasi dari molekul gas berlangsung. Terjadi sebagai dielektrik sempurna. Konduksi listrik merupakan arus yang menyebabkan terjadinya rugi-rugi dielektrik pada gas, karena elektron berdwikutub didalam aliran polarisasinya tidak memerlukan energi untuk mengatasi medan tinggi yang tidak seragam, molekul gas mulai berionisasi dengan pelepasan energi pada saat kekuatan medan di

dalam titik individual melampaui nilai kritis tertentu. Ionisasi pada udara ditandai dengan pembentukan ozon dan nitrogen oksida yang membusukkan isolasi organik yang mengandung rongga gas. Pengeluaran biaya tambahan untuk jalur/saluran tekanan tinggi (*high tension*), pelepasan daya akibat ionisasi udara di sekitar kabel (dikenal dengan efek korona) menyebabkan penurunan efisiensi daya transmisi (Setiabudy, 2007).

1.2.6 Bahan Isolasi Gas

Gas adalah zat yang mempunyai bentuk dan volume yang tidak tetap. Hal ini disebabkan karena susunan molekul-molekul gas sangat tidak teratur sehingga gaya tarik-menarik antar molekulnya sangat lemah. Partikel-partikel ini bergerak sangat bebas dan cepat dalam wadahnya. Hal ini menyebabkan zat gas tidak dapat mempertahankan bentuk dan volumenya sehingga bentuk dan volume zat gas selalu berubah mengikuti ruang yang ditempatinya. Contoh zat gas adalah udara. Udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi (Faradisha, 2014).

Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konstan. Komponen yang konsentrasinya selalu bervariasi adalah air dalam bentuk uap (H_2O) dan karbondioksida (CO_2). Jumlah uap air yang terdapat di udara bervariasi tergantung dari cuaca dan suhu. Kandungan elemen senyawa gas dan partikel dalam udara akan berubah-ubah dengan ketinggian dari permukaan tanah. Demikian juga massanya, akan berkurang seiring dengan ketinggian. Udara bumi yang kering mengandung 78% Nitrogen, 21% Oksigen dan 1% gas-gas lain (Argon, Karbon dioksida, Uap air). Kondisi gas ditentukan oleh 3 faktor, yaitu tekanan, suhu dan volume. Golongan gas yaitu Hidrogen (H_2), Nitrogen (N_2), Methana (NH_3), Karbon dioksida (CO_2), Karbon Monoksida (CO), Hidrogen Sianida, Hidrogen Sulfida, Nikel Karbonil, Sulfur Dioksida, Klor, Nitrogen Oksida, Fosgen ($COCl_2$), Arsin dan Stibin (Faradisha, 2014).

Bahan isolasi gas pada dasarnya merupakan isolator listrik dasar dan murni yang menerapkan medan listrik didalamnya. Ada tiga bahan isolasi yaitu vakum, padat, cairan dan gas. Bahan isolasi gas disebut juga sebagai gas isolator. Bahan isolasi gas praktis tidak bebas dari partikel bermuatan listrik yang dimana medan listrik perifer diterapkan pada gas, maka elektron bebas terbentuk. Elektron bebas ini dipercepat dari katoda ke anoda oleh tekanan listrik yang menerapkan gaya. Sebenarnya ini adalah penurunan resistansi bahan isolasi gas ini akan terjadi ketika tegangan yang diberikan meningkat daripada tegangan tembus (kekuatan dielektrik). Akibatnya gas akan mulai mengalir sehingga ada kenaikan tegangan yang kuat di area kecil di dalam gas. Area kenaikan tegangan yang kuat ini adalah alasan ionisasi yang terjadi dan memulai konduksi. Ini dibuat dengan sengaja dalam presipitator elektrostatik atau dalam lampu neon). Setelah tegangan tembus berkurang dengan panjang celah hingga tegangan celah berkurang melebihi titik itu, maka tegangan tembus akan melebihi nilai aslinya. Pada tekanan tinggi dan kondisi panjang selang tembus kurang lebih sebanding dengan produk keduanya.



Ini kira-kira proporsional karena efek elektroda (ketidakteraturan mikroskopis elektroda dapat menyebabkan kerusakan). Tegangan tembus gas dielektrik juga secara kasar sebanding dengan densitas. Ketika elektron ini mencapai energi yang cukup untuk melepaskan elektron dari atom atau molekul gas dan setelah itu, elektron tidak terlibat oleh molekul, dan kemudian konsentrasi elektron akan mulai meningkat secara eksponensial akibatnya terjadi kerusakan (Setiawan, 2022).

Tabel 1 Kekuatan Dielektrik Isolasi Beberapa Gas

Gas	Massa Jenis (kg/m ³)	Konduktivitas Panas (W/m)	Tegangan Tembus (kV/cm)
Udara	1,228	5.0×10^{-6}	30
Sulfur Heksafluorida (SF ₆)	6,139	1.9×10^{-5}	75
Nitrogen (N ₂)	1,191	5.4×10^{-6}	30
Karbon Dioksida (CO ₂)	1,867	3.2×10^{-6}	27
Hidrogen (H)	0,086	3.3×10^{-5}	18

Sumber: Pardede, 2017

1.2.7 Isolator Gas Sederhana

Isolator gas sederhana merupakan salah satu jenis isolator berwujud gas yang proses untuk mendapatkannya paling sederhana atau dengan kata lain mudah didapatkan, Isolator gas sederhana memiliki beberapa jenis bahan isolasi diantaranya adalah (Setiawan, 2022).

a. Udara

Bahan isolasi yang mudah diperoleh dan murah adalah udara. Udara memiliki karakteristik tegangan tembus yang relatif besar sekitar 30 kV/cm. Pemasangan jaringan distribusi baik tegangan rendah (JTR), menengah (JTM) maupun tinggi (JTT) dipisahkan dengan jarak tertentu dengan memanfaatkan udara sebagai isolatornya. Udara di alam yang secara umum terdiri dari 78% nitrogen, 21% oksigen



mondioksida, dan gas-gas lainnya. Gas ideal adalah gas yang molekul-molekul netral, sehingga tidak dapat mengalirkan arus (2).

definisi dapat diartikan sebagai unsur kimia yang dilambangkan dengan simbol kimia dan masuk pada golongan VI A pada table unsur periodik kimia.

Pada kondisi alamiah. Oksigen adalah unsur yang sangat mudah bereaksi dengan jenis unsur-unsur tunggal lainnya, oksigen digunakan oleh semua makhluk hidup maka unsur oksigen akan sangat mudah dijumpai pada berbagai belahan bumi pada manusia dan hewan, oksigen digunakan untuk proses respirasi yaitu dengan menghirup oksigen dan mengeluarkan karbondioksida sebagai hasil dari proses respirasi (Ariadi, 2021).

Oksigen (O_2) adalah molekul diatomik yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat melalui ikatan rangkap dua. Setiap atom oksigen memiliki 6 elektron valensi, sehingga untuk mencapai konfigurasi stabil, kedua atom berbagi dua pasang elektron, membentuk ikatan kovalen rangkap. Struktur molekul O_2 adalah linier, dengan sudut ikatan sebesar 180° (Widodo, 2021).

Oksigen dalam keadaan murni adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa pada suhu dan tekanan kamar. Oksigen memiliki sifat paramagnetik karena memiliki dua elektron yang tidak berpasangan di orbital molekulernya, yang menyebabkan oksigen tertarik ke medan magnet eksternal. (Widodo, 2021).

Dalam konteks isolasi listrik, oksigen murni bukanlah bahan isolator yang ideal. Sebagai gas, oksigen dapat mengalami ionisasi di bawah tegangan listrik tinggi, yang menghasilkan plasma dan menyebabkan kehilangan sifat isolatif. Ini menjadikan oksigen kurang cocok digunakan sebagai isolator listrik, terutama dalam kondisi di mana tegangan tinggi terlibat (Widodo, 2021).

c. Nitrogen

Nitrogen merupakan suatu gas yang membentuk 75% (bobot) dan 8 (volume) atmosfer, nitrogen dapat didaur ulang untuk mendapatkan perubahan dalam senyawa nitrogen dan pergerakan senyawa senyawa nitrogen yang disebabkan oleh tumbuhan, binatang dan bakteri. Nitrogen penting untuk industri kimia karena digunakan untuk membuat pupuk, asam nitrat, nilon, pewarna dan bahan peledak. Untuk membuat produk ini, nitrogen pertama-tama harus direaksikan dengan hidrogen untuk menghasilkan amonia. Hal tersebut dilakukan oleh proses Haber. 150 juta ton amonia diproduksi dengan cara ini setiap tahun (Setiawan, 2022).

Nitrogen merupakan unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang N dan nomor atom 7. Biasanya ditemukan sebagai gas tanpa warna, tanpa bau, tanpa rasa dan merupakan gas diatomik bukan logam yang stabil, sangat sulit bereaksi dengan unsur atau senyawa lainnya. Dinamakan zat lemas karena zat ini bersifat malas, tidak aktif bereaksi dengan unsur lainnya. Nitrogen merupakan senyawa penting seperti asam amino, amoniak, asam nitrat, dan sianida. Nitrogen mengembun pada suhu $77^\circ K$ ($-196^\circ C$) pada tekanan 1 atmosfer dan membeku pada suhu $63^\circ K$ ($-210^\circ C$).

Adapun sifat-sifat dari Nitrogen yaitu mempunyai massa atom relatif 14,0064, mempunyai nomor atom 7, titik didih $-196^\circ C$ dan titik beku $-210^\circ C$, mempunyai struktur heksagonal, mempunyai massa jenis 1,2151 gram/cm³, mempunyai kapasitas panas 1,042 kJ/mol, potensial ionisasi 14,534 Volt, mempunyai nilai elektronegativitas 3,04, konduktivitas kalor 0,02598 W/mK, tegangan tembus 30 kV/cm, entalpi pembentukan 0,36 kJ/mol, mempunyai harga entalpi



penguapan 2,7928kJ/mol, berupa gas tidak berwarna, tidak berasa, tidak berbau, tidak beracun, mudah menguap, tidak reaktif dan bersifat diamagnetik (L. Kumara, 2010).

d. Helium

Helium merupakan gas paling ringan setelah hidrogen, helium terdapat dalam bagian atmosfer sekitar 1 berbanding 200.000. Helium merupakan unsur kimia yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, tidak beracun, tidak mudah terbakar dan merupakan unsur pertama pada golongan gas mulia dalam tabel periodik. Perlu diingat bahwa perpindahan panas suhu dari gas helium adalah 10 kali lebih besar dibandingkan SF_6 . Kemudian helium juga memiliki sifat perpindahan panas yang terjadi lebih tinggi dari SF_6 . Helium digunakan sebagai media pendingin untuk *Large Hadron Collider* (LHC), dan magnet superkonduktor dalam pemindai MRI dan spektrometer NMR. Itu juga digunakan untuk menjaga instrumen satelit tetap dingin dan digunakan untuk mendinginkan oksigen cair dan hidrogen yang menggerakkan kendaraan ruang angkasa Apollo. Karena densitasnya yang rendah, helium sering digunakan untuk mengisi balon dekoratif, balon cuaca, dan kapal udara. Hidrogen pernah digunakan untuk mengisi balon tetapi sangat reaktif. Helium juga digunakan untuk memberikan atmosfer pelindung inert untuk membuat serat optik dan semikonduktor, dan untuk pengelasan busur. Helium juga digunakan untuk mendeteksi kebocoran, seperti pada sistem AC mobil, dan karena berdifusi dengan cepat, helium digunakan untuk mengembang kantung udara mobil setelah benturan. Campuran 80% helium dan 20% oksigen digunakan sebagai atmosfer buatan untuk penyelam laut dalam dan lainnya yang bekerja di bawah kondisi bertekanan (Setiawan, 2022).

e. Gas Oksida

Isolator gas oksida adalah salah satu jenis isolator berwujud gas yang terdiri dari satu atau lebih unsur oksigen yang bergabung dengan eleme lain. Nitrous oxide (N_2O), juga disebut dinitrogen monoksida, gas tertawa atau nitrous, salah satu dari beberapa oksida nitrogen, gas tidak berwarna dengan bau dan rasa manis yang menyenangkan, yang bila dihirup menghasilkan ketidakpekaan terhadap rasa sakit yang didahului oleh histeria ringan, terkadang tawa (karena menghirup dalam jumlah kecil memberikan efek euforia singkat dan nitrous oxide tidak ilegal untuk dimiliki, zat tersebut telah digunakan sebagai obat rekreasional.) Nitrous oxide ditemukan oleh ahli kimia Inggris Joseph Priestley pada tahun 1772, ahli kimia Inggris lainnya Humphry Davy, kemudian menamakannya dan menunjukkan efek fisiologisnya. Penggunaan utama nitrous oxide adalah sebagai anestesi dalam operasi bedah



at; inhalasi berkepanjangan menyebabkan kematian. Gas ini
agai propelan dalam aerosol makanan. Dalam balap mobil,
kan ke asupan udara mesin, oksigen ekstra memungkinkan
tar lebih banyak bahan bakar per langkah. Ini dibuat oleh aksi
t encer, oleh aksi hidrosilamin hidroklorida ($NH_2OH \cdot HCl$) pada

natrium nitrit (NaNO_2), dan paling umum, oleh dekomposisi amonium nitrat (NH_4NO_3) (Setiawan, 2022).

f. Gas Karbondioksida

Gas karbondioksida merupakan karbon dioksida (CO_2), gas tidak berwarna yang memiliki bau tajam yang samar dan rasa asam. Ini adalah salah satu gas rumah kaca paling penting yang terkait dengan pemanasan global, tetapi merupakan komponen kecil dari atmosfer bumi (sekitar 3 volume dalam 10.000), terbentuk dalam pembakaran bahan yang mengandung karbon, dalam fermentasi, dan dalam respirasi hewan dan digunakan oleh tumbuhan dalam fotosintesis karbohidrat. Kehadiran gas di atmosfer membuat sebagian energi radiasi yang diterima bumi tidak dikembalikan ke luar angkasa, sehingga menghasilkan apa yang disebut efek rumah kaca. Secara industri, itu dipulihkan untuk berbagai aplikasi beragam dari gas buang, sebagai produk sampingan dari persiapan hidrogen untuk sintesis amonia, dari limekiln, dan dari sumber lainnya. Karbon dioksida diakui sebagai gas yang berbeda dari yang lain (Setiawan, 2022).

g. Gas Sulphurdioksida

Gas sulphurdioksida adalah senyawa anorganik, gas beracun yang berat, tidak berwarna. Gas ini diproduksi dalam jumlah besar dalam langkah-langkah antara pembuatan asam sulfat. Sulfur dioksida memiliki bau yang menyengat dan menjengkelkan, akrab seperti bau korek api. Terjadi di alam dalam gas vulkanik dan dalam larutan di perairan beberapa mata air hangat, sulfur dioksida biasanya dibuat secara industri dengan pembakaran di udara atau oksigen dari belerang atau senyawa belerang seperti pirit besi atau pirit tembaga. Sejumlah besar belerang dioksida terbentuk dalam pembakaran bahan bakar yang mengandung belerang. Di atmosfer ia dapat bergabung dengan uap air untuk membentuk asam sulfat, komponen utama hujan asam; pada paruh kedua abad ke-20, langkah-langkah untuk mengendalikan hujan asam diadopsi secara luas. Sulfur dioksida adalah prekursor trioksida (SO_3) yang digunakan untuk membuat asam sulfat. Di laboratorium, gas dapat dibuat dengan mereduksi asam sulfat (H_2SO_4) menjadi asam sulfat (H_2SO_3), yang terurai menjadi air dan sulfur dioksida, atau dengan mengolah sulfit (garam dari asam sulfat) dengan asam kuat, seperti asam klorida, lagi. Membentuk asam sulfat. Sulfur dioksida dapat dicairkan di bawah tekanan sedang pada suhu ruangan, cairan membeku pada 73°C ($-99,4^\circ\text{F}$) dan mendidih pada 10°C (14°F) di bawah tekanan atmosfer. Meskipun kegunaan utamanya adalah dalam pembuatan asam sulfat, sulfur trioksida, dan sulfit, sulfur dioksida juga digunakan sebagai desinfektan, zat pemutih, zat pereduksi, pemutih, dan pengawet makanan, terutama pada buah-buahan (Setiawan, 2021).



h. Gas Hidrokarbon

Gas hidrokarbon merupakan suatu senyawa yang terdiri dari unsur karbon dan unsur hidrogen. Seluruh hidrokarbon memiliki rantai karbon dan atom-atom hidrogen yang berikatan dengan rantai tersebut. Hidrokarbon merupakan salah satu sumber energi paling penting di bumi, penggunaan yang utama merupakan sebagai sumber bahan bakar. Dalam bentuk padat hidrokarbon merupakan salah satu komposisi pembentuk aspal. Hidrokarbon yang berwujud gas metana dan etana dalam suhu ruangan dan tidak mudah untuk dicairkan dengan tekanan. Propana lebih mudah untuk dicairkan dan biasanya dijual dalam tabung-tabung dalam bentuk cair. Isolator gas hidrokarbon memiliki beberapa jenis bahan isolasi diantaranya adalah (Setiawan, 2022):

- **Metana**

Metana adalah metana, gas tidak berwarna, tidak berbau yang banyak terdapat di alam dan sebagai produk aktivitas manusia tertentu. Metana adalah anggota paling sederhana dari rangkaian hidrokarbon parafin dan merupakan salah satu gas rumah kaca yang paling kuat. Rumus kimianya adalah CH_4 (Setiawan, 2022).

- **Etana**

Etana adalah gas hidrokarbon gas yang tidak berwarna, tidak berbau, (senyawa hidrogen dan karbon), yang termasuk dalam seri parafin; rumus kimianya adalah C_2H_6 . Etana secara struktural adalah hidrokarbon paling sederhana yang mengandung ikatan karbon-karbon tunggal. Konstituen terpenting kedua dari gas alam, juga terjadi terlarut dalam minyak bumi dan sebagai produk sampingan dari operasi kilang minyak dan karbonisasi batu bara (Setiawan, 2022).

- **Propana**

Gas propana adalah hidrokarbon gas yang tidak berwarna, mudah dicairkan (senyawa karbon dan hidrogen), anggota ketiga dari seri parafin setelah metana dan etana. Rumus kimia propana adalah C_3H_8 . Ini dipisahkan dalam jumlah besar dari gas alam, minyak mentah ringan, dan gas penyulingan minyak dan tersedia secara komersial sebagai propana cair atau sebagai konstituen utama gas LPG (Setiawan, 2022).

i. Gas Elektronegatif

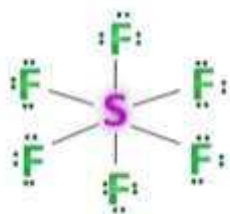
Gas elektronegatif merupakan gas yang banyak digunakan di lingkungan Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai media isolasi dan pendingin pada ruang (chamber) pemutus PMT atau pada kompartemen kompartemen Gas Insulation (GI) (Setiawan, 2022).



safleurida

ida (SF_6) adalah molekul dengan struktur oktahedral, di mana kat oleh enam ikatan kovalent tunggal dengan atom fluor di ur ini dihasilkan dari hibridisasi sp^3d^2 pada atom sulfur, katan sigma yang kuat dan simetris. Panjang ikatan S-F sekitar

1,56 Å, dan molekul SF₆ sangat stabil serta tidak reaktif dalam kondisi normal. Stabilitas ini dan sifat isolasi gas yang tinggi menjadikan SF₆ sangat cocok untuk digunakan sebagai isolator dalam peralatan kelistrikan bertegangan tinggi. (Widodo, 2021).



Gambar 3 Struktur Lewis Sulfur Heksafluorida (SF₆)

Sumber: Byju's (2024)

Sulfur Heksafluorida atau SF₆ adalah isolator listrik yang sangat baik dan secara efektif dapat memadamkan busur, yang membuat apparatus tegangan tinggi. SF₆ dapat ditemukan pada jutaan peralatan listrik di seluruh dunia, contoh peralatan listrik yang mengandung SF₆ adalah pengaman busur di *circuit breaker*. Gas SF₆ dibentuk oleh reaksi kimia antara belerang cair dan fluor. Fluor diperoleh dengan elektrolisis asam hidrofluorat (HF). Gas SF₆ murni tidak beracun. Gas tidak berbahaya untuk dihirup, asalkan kandungan oksigennya cukup tinggi. Pada prinsipnya manusia dapat menghirup campuran 20% oksigen dan 80% SF₆ tanpa bahaya. SF₆ sekitar 6 kali lebih berat dari udara, hal itu berarti bahwa SF₆ dapat terkumpul di saluran kabel atau di bagian bawah tangki. SF₆ tidak berbahaya untuk dihirup tetapi jika terakumulasi pada ruangan tempat bekerja, ada risiko mati lemas karena kekurangan oksigen. SF₆ adalah gas yang tidak mudah terbakar yang digunakan dalam peralatan listrik. Unsur sulfur dengan fluor terjadi reaksi eksotermis membentuk Sulfur Heksafluorida (SF₆). Penggunaan paling umum untuk SF₆, baik domestik maupun internasional adalah sebagai isolator listrik pada peralatan bertegangan tinggi yang mentransmisikan dan mendistribusikan listrik. Gas SF₆ masih menduduki posisi sebagai gas terberat dengan densitas sebesar 6,139 kg/m³ hingga saat ini. Densitas ini 5 kali dari berat udara pada temperatur 100°C pada tekanan 1 atm. Karakteristik lainnya adalah tidak larut pada air namun terlarut dalam etanol, heksana dan benzena, tidak beracun, tidak terbakar, tidak berbau dan tidak berwarna. Gas SF₆ memiliki kemampuan isolasi yang baik yaitu 2,5 kali dari udara (Setiawan, 2022).

Sifat gas SF₆ murni yang inert, tidak berwarna, berbau, dan beracun, serta tidak mudah terbakar dan dapat mengembalikan kekuatan dielektrik dengan cepat, tidak terbentuk karbon selama terjadi busur api dan tidak menimbulkan bunyi pada saat tutup atau membuka serta kekuatan dielektriknya yang 2 hingga 3 kali dibandingkan dengan kekuatan dielektrik udara menjadi landasan penggunaan SF₆ pada peralatan tegangan tinggi. Namun, gas SF₆ tidak memiliki kemampuan serapan inframerah yang kuat dan memiliki potensi pemanasan global yang tinggi (Hasan, 2012).



1.2.8 Medan Listrik

Medan listrik merupakan area di sekitar muatan di mana gaya listrik masih berpengaruh. Menurut Michael Faraday, medan listrik digambarkan sebagai garis vektor yang memancar keluar dari muatan positif dan menuju muatan negatif. Semakin kuat medan listrik, semakin rapat garis-garis medan yang menggambarkannya (Harry, 2008).

Distribusi medan listrik adalah cara penyebaran medan listrik di ruang antara elektroda positif (anoda) dan negatif (katoda). Intensitas medan listrik bervariasi pada setiap titik dalam jarak tersebut. Intensitas ini memberikan tekanan listrik pada bahan dielektrik, yang dikenal sebagai stress listrik. Kekuatan maksimum bahan dalam menahan stress listrik tanpa mengalami *breakdown* disebut kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dan tekanan listrik biasanya diukur dalam satuan kV/cm (Harry, 2008).

Distribusi medan listrik dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu seragam dan tidak seragam. Keseragaman distribusi medan listrik di antara elektroda dapat diukur melalui nilai efisiensi medan listrik, yang didefinisikan oleh Schwaiger. Besar faktor efisiensi medan listrik tergantung pada bentuk geometris susunan elektroda. Untuk susunan elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik yang homogen, efisiensinya mendekati 1, sementara untuk susunan yang menghasilkan distribusi medan listrik yang tidak homogen, nilai efisiensinya kurang dari 1 (Harry, 2008).

1.2.9 Proses Dasar Kegagalan Gas

Isolasi memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Isolasi sangat diperlukan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan sehingga antara penghantar-penghantar tersebut tidak terjadi lompatan listrik atau percikan. Bahan isolasi akan mengalami pelepasan muatan yang merupakan bentuk kegagalan listrik apabila tegangan yang diterapkan melampaui kekuatan isolasinya. Kegagalan yang terjadi pada saat peralatan sedang beroperasi bisa menyebabkan kerusakan alat sehingga kontinuitas sistem terganggu.

Pada peralatan tegangan tinggi isolasi sangat diperlukan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan sehingga antara penghantar-penghantar tersebut tidak terjadi lompatan listrik atau percikan.

1.2.9.1 Proses Dasar Ionisasi

Ion merupakan atom atau gabungan atom yang memiliki muatan listrik, ion terbentuk apabila pada peristiwa kimia suatu atom unsur menangkap atau melepaskan elektron. Proses terbentuknya ion dinamai dengan ionisasi. Dalam proses pelepasan listrik ada beberapa mekanisme pembangkitan atau kehilangan



elektron tunggal maupun dalam kombinasi. Proses dasar pelepasan elektron (Muharrihan, 2011):

1. Ionisasi dengan cara benturan (*collision*) elektron, fotoionisasi, tumbukan ion positif, ionisasi termal, pelepasan (*detachment*) elektron kumulatif dan efek sekunder.

2. Ionisasi dengan cara penggabungan (*attachment*) elektron, rekombinasi

Jika dua elektroda yang berada dalam suatu media gas diberi tegangan (V), maka akan timbul suatu medan listrik (E) yang memiliki besar dan arah tertentu yang menghasilkan elektron bebas untuk merangsang terjadinya ionisasi. Benturan-benturan yang akan membebaskan elektron lebih dapat terjadi karena tiap-tiap elektron menuju ke anoda secara kontiniu. Ionisasi menjadi bagian yang penting dalam proses kegagalan isolasi udara atau gas (Pardede, 2017).

1.2.9.2 Ionisasi Karena Benturan Elektron

Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan dengan jumlah ion yang ditangkap molekul oksigen. Tiap-tiap elektron ini kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinu sambil membuat benturan-benturan yang akan membebaskan elektron lebih banyak lagi. Ionisasi karena benturan ini merupakan proses dasar yang penting dalam kegagalan udara atau gas (Kunhardt, 2001).

1.2.9.3 Mekanisme Kegagalan Gas

Proses kegagalan dalam gas ditandai dengan adanya percikan secara tiba-tiba, percikan ini dapat terjadi karena adanya pelepasan yang terjadi pada gas tersebut. Mekanisme kegagalan gas yang disebut percikan adalah peralihan dari pelepasan tak bertahan sendiri ke berbagai pelepasan yang bertahan sendiri. Proses dasar yang paling penting dalam kegagalan gas adalah proses ionisasi karena benturan, tetapi proses ini tidak cukup untuk menghasilkan kegagalan. Proses lain yang terjadi dalam kegagalan gas adalah proses atau mekanisme primer dan proses atau mekanisme sekunder. Proses yang terpenting dalam mekanisme primer adalah proses katoda, pada proses ini diawali dengan pelepasan elektron oleh suatu elektroda yang diuji, peristiwa ini akan mengawali terjadinya kegagalan percikan (*spark breakdown*). Elektroda yang memiliki potensial rendah (katoda) akan menjadi elektroda yang melepaskan elektron. Elektron awal yang dibebaskan (dilepaskan) oleh katoda akan memulai terjadinya banjir elektron dari permukaan katoda (Manjang, 2023).

Jika jumlah elektron yang dibebaskan makin lama makin banyak atau terjadinya peningkatan banjir maka arus akan bertambah dengan cepat sampai terjadi perubahan pelepasan dan peralihan pelepasan ini akan menimbulkan percikan (kegagalan) dalam gas.

1. Mekanisme Kegagalan Townsend

Mekanisme Kegagalan *Townsend* pada mekanisme primer, medan listrik yang ada di antara elektroda akan menyebabkan elektroda yang dibebaskan bergerak



ul energi yang cukup kuat untuk menimbulkan banjir elektron. ang terdapat dalam banjir elektron pada lintasan sejauh dx rigan dn_c elektron, sehingga elektron bebas tambahan yang dx adalah:

$$dn_e = a \cdot n_e \cdot dx \dots\dots\dots 1$$

Sehingga jumlah elektron bebas dn_c yang bertambah akibat proses ionisasi sama besarnya dengan jumlah ion positif dn_+ baru yang dihasilkan, sehingga

$$dn_c = dn_+ = a \cdot n_e \cdot dx = a \cdot n_e \cdot (t) \cdot v_d \cdot dt \dots\dots\dots 2$$

Dimana,

- dn_+ = jumlah ion positif baru yang dihasilkan.
- a = kecepatan terbentuknya partikel
- n_e = jumlah total elektron.
- t = waktu
- v_d = kecepatan elektron.

Pada medan uniform (α konstan, dengan syarat awal):

$$n_e = n_0, x = 0 \dots\dots\dots 3$$

sehingga,

$$n_e = n_0 e^{a \cdot x} \dots\dots\dots 4$$

Jumlah elektron yang menumbuk anoda per detik sejauh d dari katoda sama dengan jumlah ion positif.

$$n_+ = n_0 e^{a \cdot x} \dots\dots\dots 5$$

maka jumlah elektron yang meninggalkan katoda dan mencapai anoda:

$$n_e = \frac{n_0 e^{a \cdot d}}{1 - e^{-a \cdot d}} \dots\dots\dots 6$$

Dimana:

- n_0 : arus yang meninggalkan katoda
- d : jarak sela

Mekanisme *Townsend* menjelaskan tentang fenomena kegagalan yang hanya terjadi pada tekanan yang rendah dibawah tekanan atmosfer. Pada tekanan diatas tekanan atmosfer berlaku mekanisme strimer yang mempersyaratkan adanya distorsi medan karena muatan ruang (Prihatnolo et al., 2011):

2. Mekanisme Kegagalan *Streamer* (Kanal)

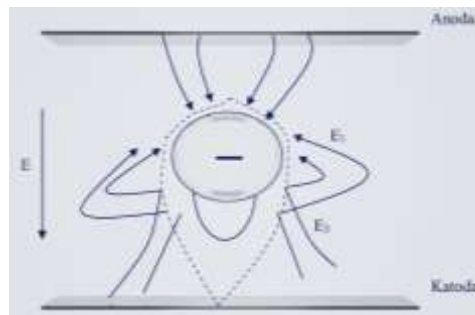
Mekanisme strimer (*streamer*) menjelaskan pengembangan pelepasan percikan langsung dari banjiran tunggal di mana muatan ruang (*space charge*) yang terjadi karena banjiran itu sendiri mengubah banjiran tersebut menjadi strimer plasma. Sesudah itu kehantaran naik dengan cepat dan kegagalan terjadi dalam alur (*channel*) banjiran ini. Ciri utama teori kegagalan strimer, di samping proses ionisasi

nd , adalah postulasi sejumlah besar fotoionisasi molekul gas strimer dan pembesaran medan listrik setempat oleh muatan strimer, dimana ruangan ini menimbulkan distorsi medan dalam ipat dianggap stasioner dibandingkan dengan elektron-elektron cepat, dan banjiran terjadi dalam sela dalam bentuk awan lakangi muatan ruang ion positif seperti yang dapat dilihat pada



Ada dua jenis strimer (Prihatnolo et al., 2011):

- Positif, atau strimer yang mengarah ke katoda
- Negatif, atau strimer yang menuju ke anoda



Gambar 4 Mekanisme Streamer

Sumber: Manjang, 2023

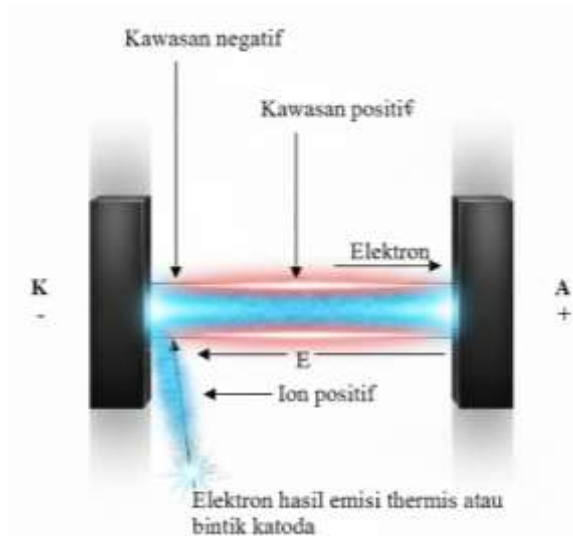
Teori tentang *streamer* positif menjelaskan bahwa pada waktu banjir telah menyeberangi sela, elektron-elektron tersedot ke dalam anoda, ion-ion tinggal dalam sela membentuk kerucut. Medan muatan ruang yang tinggi terjadi dekat anoda tetapi di tempat lain dengan kerapatan ion rendah, dan karena itu kehadiran ion-ion positif saja tidak akan menimbulkan kegagalan dalam sela. Namun, akan timbul fotoelektron-fotoelektron dalam gas yang mengelilingi banjir yang disebabkan oleh pancaran foton-foton gas yang terionisasi pada tangkai (stem) banjir. Elektron-elektron ini mengawali timbulnya banjir bantu (*auxiliary*), yang jika medan muatan ruang yang terjadi karena banjir utama kira-kira sama besarnya dengan medan luar, akan mengarah kepada tangkai banjir utama. Pelipat ganda terbesar dalam banjir bantu ini terjadi sepanjang sumbu banjir utama di mana medan muatan ruang menunjang medan luar (Prihatnolo et al., 2011):

Ion-ion positif yang tertinggal di belakang banjir akan memanjang dan mengintensitas muatan ruang banjir utama ke arah katoda, dan proses ini berkembang menjadi streamer atau kanal yang merambat sendiri, artinya tindakan ini membentuk plasma penghantar yang memperdekat jarak antara katoda dan anoda. Sesudah itu streamer terus memanjang sehingga merentangi sela membentuk saluran penghantar berupa gas terionisasi antara elektroda (Winoto et al., 2011).

1.2.10 Proses Terjadinya Busur Api



Pada waktu terjadi pemutusan atau penghubungan suatu rangkaian sistem trik maka akan terjadi gesekan antara kontak-kontak yang akan ragan. Akibat adanya beda tegangan antara kontak-kontak menimbulkan medan listrik. terlebih lagi karena beda tegangan munculah busur api. Terjadinya busur api, diperlihatkan pada ono, 2017).



Gambar 5 Proses Terjadinya Busur Api
 Sumber: Suprianto, (2015)

Arus yang sebelumnya mengalir pada kontak akan memanaskan kontak dan menghasilkan emisi termis pada permukaan kontak, sedangkan medan elektrik menimbulkan emisi medan tinggi pada kontak katoda. Kedua emisi ini menghasilkan elektron bebas yang sangat banyak dan bergerak menuju kontak anoda. Elektron-elektron ini membentur molekul netral media isolasi di kawasan positif, benturan-benturan ini akan menimbulkan proses ionisasi di kawasan positif, benturan-benturan ini akan menimbulkan proses ionisasi. Dengan demikian jumlah elektron bebas yang menuju anoda akan semakin bertambah dan muncul ion positif hasil ionisasi yang bergerak menuju katoda, perpindahan elektron bebas ke anoda menimbulkan arus dan memanaskan kontak anoda. Kion positif yang tiba di kontak katoda akan menimbulkan dua efek yang berbeda. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya tinggi, misalnya tungsten atau karbon, maka ion positif akan menimbulkan pemanasan di katoda, akibatnya emisi termis semakin meningkat. Jika kontak terbuat dari bahan yang titik leburnya rendah, misalnya tembaga, ion positif akan menimbulkan emisi medan yang tinggi. Hasil emisi termis ini dan emisi medan tinggi akan melanggengkan proses ionisasi, sehingga perpindahan muatan antar kontak terus berlangsung dan inilah yang disebut busur api. Jika pengurangan partikel bermuatan karena proses deionisasi lebih banyak daripada penambahan muatan karena proses ionisasi, maka busur api akan padam. Ketika busur api padam, di sela-sela terpaan medan elektrik. Jika suatu saat terjadi terpaan medan listrik yang lebih besar daripada kekuatan dielektrik media isolasi kontak, maka busur api akan menyala kembali (Setiono, 2017).



1.2.11 Gas SF₆

Gas SF₆ pada Pemutus Tenaga (PMT) berfungsi sebagai media pemadam busur api listrik saat terjadi pemutusan arus listrik (arus beban atau arus gangguan) dan sebagai isolasi antara bagian – bagian yang bertegangan (kontak tetap dengan kontak bergerak pada ruang pemutus) dalam Pemutus Tenaga (PMT), juga sebagai isolasi antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada PMT. Saat ini gas SF₆ banyak digunakan pada PMT atau GIS (*Gas Insulating Switchyard*) mulai dari tegangan 20 kV sampai dengan 500 kV karena gas SF₆ mempunyai sifat / karakteristik yang lebih baik dari jenis media pemutus lainnya (Setiono, 2017).

Gas SF₆ merupakan salah satu media isolasi yang baik, dapat berfungsi sebagai penyekat antara bagian bertegangan dengan ground hanya dengan jarak yang sangat pendek jika di dibandingkan dengan isolasi udara. Selain itu jika terjadi percikan api / busur api pada peralatan yang di isolasi gas SF₆, maka gas tersebut akan berfungsi sebagai pemadam busur api, sehingga tidak terjadi kerusakan yang lebih parah pada peralatan tersebut (Setiono, 2017). Menurut (Robecca et al., 2019) Gas SF₆ memiliki Sifat :

1. Tidak Berwarna
2. Tidak Berbau
3. Tidak Beracun
4. Tidak Mudah Terbakar Dengan konsentrasi SF₆ melebihi 35% volume dalam udara itu berbahaya bagi manusia dan dapat berakibat mati lemas kekurangan oksigen.

	IEC 60376 Specification for new SF ₆ gas	IEC 60376 Specification for used SF ₆ gas
SF ₆	> 99.5 Vol.-% For gas mixtures: > 99.7 Vol.-%	> 97 Vol.-% For gas mixtures: ±5% from the normal value
Air/CF ₄	Air: < 10,000 µl/l (i.e. 1 Vol.-%) for pure SF ₆ gas. For gas mixtures: < 2,000 µl/l (i.e. 0.2 Vol.-%) CF ₄ : < 4,000 µl/l (i.e. 0.4 Vol.-%) for pure SF ₆ gas. For gas mixtures: < 800 µl/l (i.e. 0.08 Vol.-%)	< 30,000 µl/l (i.e. 3% Vol.) For gas mixtures: SF ₆ /N ₂ mixtures: < 30,000 µl/l (air and/or CF ₄) SF ₆ /N ₂ mixtures: < 30,000 µl/l (air and/or N ₄)
Moisture (dew point)	< 200 µl/l (i.e. 200 ppmv; -35°C frost point @ atm)	< 200 µl/l (i.e. 200 ppmv; -36°C frost point @ atm)
Oil	< 10 mg/kg (i.e. 10 ppmw)	< 10 mg/kg (i.e. 10 ppmw)
HF, SO ₂	< 7 µl/l (i.e. 7 ppmv) total	< 50 µl/l total (i.e. 50ppmv) or 12 µl/l (i.e. 12ppmv) For (SO ₂ +SOF ₂) or 25 µl/l (i.e. 25 ppmv) HF



Spesifikasi SF₆ yang Baik untuk Peralatan Listrik
Sumber: IEC 60376

Pencemaran Gas SF₆ adalah mengandung racun yang berakibat pada kulit, mata dan dapat merusak selaput lendir dan bila terpegang lama akan mengganggu pangkal tenggorokan dan gangguan paru-paru, hati dan peredaran napas terhenti seperti pingsan (Setiono, 2017).

1.2.12 Sifat-Sifat Gas SF₆

1.2.12.1 Sifat-Sifat Fisik SF₆

SF₆ yang murni adalah tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah tercampur. Berat jenis SF₆ pada temperatur 200°C dan pada tekanan 760 mmHg adalah 6,135 kg/m³. Jika dibandingkan dengan berat jenis udara adalah lima kalinya. Gas ini akan mencair pada temperatur yang rendah, temperatur pencairan bergantung pada tekanan yang diberikan. Pada temperatur 100°C dan tekanan 15 atm, gas akan mencair. Jika tekanan gas ini tinggi, temperatur pencairan tinggi. Biasanya tekanan yang digunakan pada pemutus tenaga tegangan menengah adalah 7 bar (kopling galvanic/cm²). Dengan tekanan sebesar itu, kekuatan dielektrik menjadi besar sehingga dapat menahan tegangan transien yang terjadi pada waktu pembukaan kontak-kontaknya (Setiono, 2017).

1.2.12.2 Sifat-Sifat Dielektrik SF₆

Kekuatan dielektrik SF₆ adalah 5 kali kekuatan dielektrik udara pada tekanan beberapa *atmosphere*. Kekuatan dielektrik unsur gas ini akan bertambah besar menurut tekanannya (Setiono, 2017).

1.2.12.3 Sifat-Sifat Kimiawi SF₆

Di dalam sebuah molekul SF₆, atom sulfurnya terdapat pada daerah valensi tertinggi dari daerah valensi molekulnya. Sedangkan keenam ikatan molekulnya ialah kovalen, yang mana ini merupakan kelebihan dari molekul ini yang stabil. Susunan molekul dari SF₆ merupakan bidang delapan yang pada keenam sudutnya ditempati atom fluoride (Setiono, 2017).

SF₆ adalah gas yang tidak mempunyai sifat kimia yang aktif sampai di atas 1500°C dan tidak akan merusak logam, plastik dan bahan lain yang biasa digunakan pada komponen pemutus tenaga. Hal ini dapat dibuktikan dengan memanaskan gas tersebut sampai 5000°C tanpa terjadi penguraian. Pada temperatur tinggi yang disebabkan oleh busur api listrik, gas akan terurai dalam beberapa unsur, yaitu SF₂ dan SF₄ dalam jumlah yang kecil dan unsur-unsur S₂, F₂, S, F. Bila unsur SF₂ ini bereaksi dengan air, akan membentuk unsur hydrogen fluoride yang mempunyai sifat korosif terhadap porcelain. Semua unsur yang terurai akan berkombinasi kembali seperti semula setelah temperaturnya turun. Unsur SF₆ yang



terdiri dari 65% sulfur dan 35% fluoride. Atom fluoride mempunyai sifat berfungsi untuk menangkap elektron bebas ke bentuk muatan negatif yang tidak dapat digunakan sebagai pembawa arus. Sifat ini menyebabkan waktu pembusuran pendek, kekuatan dielektrik yang tinggi. Kestabilan yang tinggi dari gas ini disebabkan enam ikatan kovalen molekul- molekulnya. Di samping itu, ikatan ini berada diantara

atom sulfur, sedangkan enam atom fluoride membentuk suatu bangun octahedron. Karena unsur SF_6 tidak mempunyai sifat kimia yang aktif, maka akan sangat menguntungkan bila dipakai pada pemutus tenaga tegangan menengah. Bagian-bagian logam dan kontak-kontak yang dialiri arus dalam unsur SF_6 tidak akan rusak (Setiono, 2017).

1.2.13 Unsur-Unsur Kimia dalam Gas SF_6

Unsur-unsur kimia yang terkandung dan tingkat kemurnian pada Gas SF_6 antara lain adalah (Setiono, 2017):

1. Carbon tetrafluoride (CF_4) 0,03%
2. Oxygen + nitrogen (air) 0,03
3. Water 15ppmM SF_6 : 99,9%
4. CO_2 traces
5. HF 0,3ppmM

1.2.14 Kelebihan & Kekurangan Gas SF_6

Penggunaan media ini sebagai media isolasi terhadap busur api yang terjadi pada kontak pemutus memiliki beberapa kelebihan, kekurangan, dan dampak terhadap manusia serta peralatan, diantaranya sebagai berikut (Pambudi & Latifa, 2023) :

Kelebihan:

1. Mengurangi pemakaian sejumlah pemutus jenis lainnya dalam hubungan seri per *phasa* pada rating tegangan yang digunakan.
2. Dapat mengurangi busur api dari gesekan kontak secara cepat dan efisien.
3. Hasil busur api yang telah diredam oleh Gas SF_6 adalah serpihan serbuk yang kemudian dapat dibersihkan saat melakukan revisi.
4. Gas *blast* ini tidak melepaskan muatan ke *atmosphere* sehingga saat melakukan pekerjaan akan lebih tenang dibandingkan dengan pemutus udara,
5. Memiliki sifat kimia yang rendah, tidak berwarna, serta stabil.
6. Memiliki dimensi yang lebih jika dibandingkan dengan pemutus tegangan lainnya.

Kekurangan:

1. Memiliki dimensi yang lebih jika dibandingkan dengan pemutus tegangan yang lain.
2. Membutuhkan waktu yang lama jika ada gangguan terhadap pemutusan tegangan, bahkan bisa meledak jika indikator kurang dari yang di tentukan.
3. Gas ini harus dipompa terlebih dahulu kedalam tabung sebelum melakukan pekerjaan.

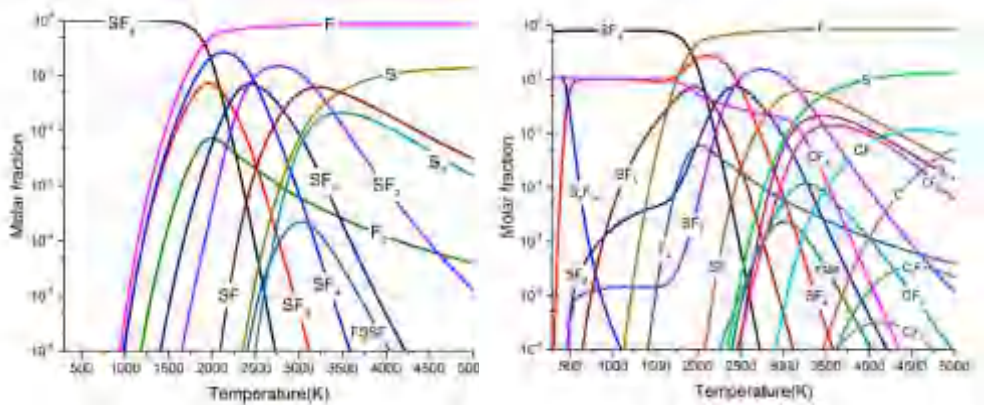


au monitoring harus dilakukan dengan pengukuran suhu, ini na titik leburnya yang sangat rendah.

a SF_6 saat Pemutusan Arus

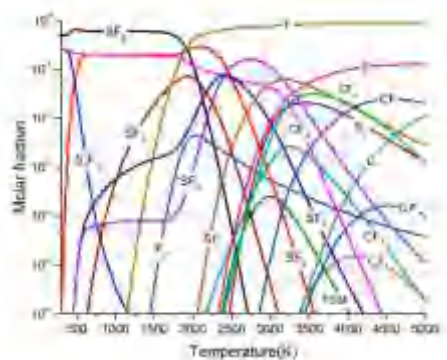
ida (SF_6) diklasifikasikan sebagai gas rumah kaca dengan yang signifikan dan termasuk dalam enam gas yang Protokol Kyoto. Laporan IPCC tahun 2013 menunjukkan bahwa

nilai Global Warming Potential (GWP) SF_6 mencapai sekitar 23.900 kali CO_2 , disertai waktu tinggal di atmosfer yang sangat panjang, yaitu ± 3.200 tahun. Meskipun demikian, SF_6 masih banyak dimanfaatkan dalam sistem tenaga listrik karena memiliki kekuatan dielektrik tinggi, kemampuan pemadaman busur yang efektif, serta stabilitas kimia yang sangat baik, khususnya pada peralatan pemutus arus tegangan tinggi (Yang dkk., 2021).



(a)

(b)



(c)

Gambar 7 Komposisi Partikel Plasma Busur SF_6 (a) SF_6 Murni pada Tekanan 0,6 MPa. (b) 90% SF_6 + 10% PTFE. (c) 80% SF_6 + 20% PTFE

Sumber: Yang dkk, (2021)

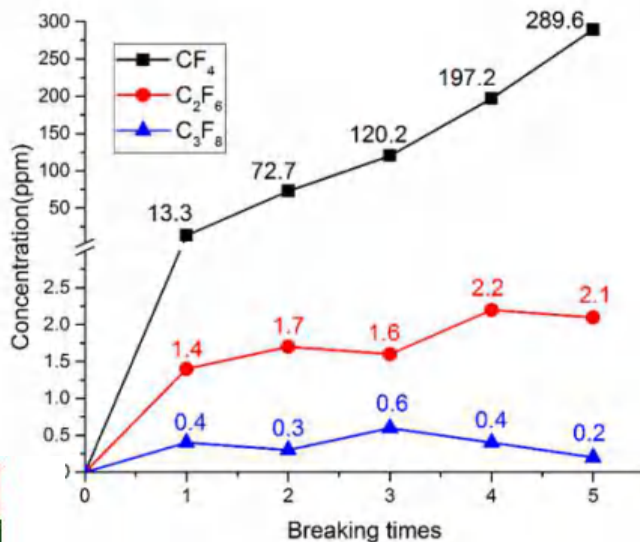


emutusan arus, busur listrik menghasilkan temperatur yang
a memicu disosiasi molekul SF_6 dan membentuk plasma busur.
uk berbagai spesies hasil dekomposisi berupa fluorida berang
seperti SF_5 , SF_4 , SF_3 , SF_2 , dan SF , serta atom berang
ur listrik mulai meredup dan temperatur menurun, spesies-

spesies tersebut cenderung mengalami rekombinasi dan membentuk kembali molekul SF_6 (Yang dkk., 2021).

Dalam kondisi operasi nyata, plasma busur tidak hanya dipengaruhi oleh SF_6 murni, tetapi juga oleh keberadaan kontaminan seperti uap air (H_2O), oksigen (O_2), serta uap hasil ablasi material nozzle berbasis polytetrafluoroethylene (PTFE). Interaksi antara spesies tersebut menghasilkan berbagai produk samping, antara lain SOF_2 , SO_2 , SO_2F_2 , HF , CO , CO_2 , serta senyawa karbon berfluorinasi seperti CF_4 , C_2F_6 , dan C_3F_8 . Pada tekanan 0,6 MPa, disosiasi SF_6 mulai terjadi pada temperatur sekitar 1000 K, dengan pembentukan awal SF_5 dan SF_4 . Dengan meningkatnya temperatur, spesies SF_3 , SF_2 , dan SF terbentuk secara bertahap, di mana fraksi mol maksimum didominasi oleh SF_4 dan SF_2 akibat mekanisme pemutusan ikatan S–F secara berurutan.

Ketika temperatur busur melebihi 3000 K, seluruh fluorida belerang mengalami penurunan fraksi mol dan terurai menjadi atom penyusunnya. Selama proses pendinginan hingga temperatur di bawah 1000 K, spesies-spesies tersebut kembali berekombinasi membentuk SF_6 . Pada sistem yang melibatkan PTFE, radikal CF_2 bereaksi dengan atom F membentuk CF_4 dan CF_3 , sehingga mengurangi ketersediaan atom F untuk rekombinasi SF_6 dan memicu pembentukan S_2F_{10} . Secara eksperimental, setelah lima kali pemutusan, konsentrasi CF_4 mencapai 289,6 ppm, sedangkan C_2F_6 dan C_3F_8 masing-masing hanya 2,1 ppm dan 0,2 ppm, yang menunjukkan bahwa CF_4 merupakan produk dominan akibat ablasi PTFE, sementara pembentukan C_2F_6 dan C_3F_8 sangat terbatas (Yang dkk., 2021).



n Konsentrasi CF_4 , C_2F_6 , dan C_3F_8 Seiring dengan Waktu Pemecahan

Sumber: Yang dkk, (2021)



Gas sulfur heksafluorida (SF_6) yang bersifat stabil pada kondisi normal akan mengalami dekomposisi kimia ketika terpapar pelepasan listrik berenergi tinggi, seperti busur listrik selama proses pemutusan arus. Energi dan temperatur tinggi yang dihasilkan menyebabkan pemutusan ikatan S–F pada molekul SF_6 , sehingga terbentuk berbagai produk dekomposisi berupa fluorida belerang dan senyawa berfluorinasi lain. Produk-produk ini umumnya memiliki sifat kimia yang lebih reaktif dan berpotensi bersifat toksik serta korosif dibandingkan SF_6 murni, sehingga dapat memengaruhi kinerja dan keandalan peralatan listrik tegangan tinggi (Liu et al., 2015).

Pembentukan dan komposisi produk dekomposisi SF_6 dipengaruhi oleh karakteristik discharge serta kondisi lingkungan di dalam peralatan, termasuk keberadaan kontaminan seperti uap air dan oksigen. Analisis terhadap jenis dan konsentrasi produk dekomposisi menggunakan metode identifikasi seperti gas chromatography–mass spectrometry dan teknik elektrokimia memberikan informasi penting mengenai kondisi operasional dan tingkat gangguan pada sistem isolasi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap reaksi kimia SF_6 selama pemutusan arus memiliki peranan strategis dalam evaluasi kondisi peralatan, peningkatan keselamatan operasi, serta perencanaan pemeliharaan sistem tenaga Listrik (Liu et al., 2015).

1.2.16 Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus arus atau *circuit breaker* ialah saklar mekanis yang dapat menutup, mengalirkan dan memutuskan arus beban pada kondisi normal dan mengalihkan arus pada periode gangguan seperti short circuit. Pemutus tenaga (PMT) adalah perangkat listrik yang dirancang untuk melindungi sistem daya jika terjadi kegagalan sistem. Kegagalan sistem dapat memiliki berbagai efek, termasuk stabilitas termal, magnetik, dan dinamis. Fungsi utamanya adalah sebagai rangkaian switch gear di bawah beban, yang dapat dibuka dan ditutup ketika terjadi gangguan arus (korsleting) di jaringan dan lainnya (Samsurya dkk, 2023).

Penyaluran tenaga listrik, yang dapat membuka dan menutup pada kondisi berbeban dan hubung singkat, juga kondisi tegangan normal maupun tidak normal. Syarat yang harus dipenuhi oleh PMT antara lain (Setiono, 2017):

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem.

Pemutus sirkuit terisolasi gas SF_6 memiliki persyaratan yang berbeda dalam sifat dielektrik gas SF_6 sangat baik dalam membantu proses yaitu saat pemutus sirkuit dibuka dan ditutup. Karena sifat dan penghantar panas yang baik, isolator yang baik, mampu api dan tidak mudah bereaksi dengan bahan lain. Meskipun eracun, SF_6 dapat menggantikan udara, menyebabkan oksigen yang dapat dihirup makhluk hidup. Namun busur yang putus dapat merusak peralatan terutama PMT itu sendiri, PMT



memiliki banyak klasifikasi jika dilihat dari media isolasinya. Salah satu PMT dengan media pemisahan gas SF₆ (Sulfur Hexafluoride). Penggunaan gas SF₆ sebagai media isolasi pada PMT bertujuan untuk mengurangi terjadinya proses arc (Samsurya dkk, 2023).

Menyadari efek dari kebocoran SF₆ yang dapat mempercepat terjadinya kerusakan pada PMT, maka dilakukan analisa kebocoran SF₆ agar dapat mendeteksi lebih dini. Pendeteksian SF₆ lebih cepat dapat mengurangi dampak kerusakan yang bahkan dapat mencegah putusnya PMT (Samsurya dkk, 2023).

1.2.16.1 Klasifikasi Pemutus Tenaga

Pemutus Tenaga dibedakan dari beberapa type, dengan berdasarkan tingkat tanggapan kerjanya, mekanik penggerak utama, media pemadaman, dan juga proses pemadaman.

1. Besar Tegangan PMT dapat dibedakan menjadi
 - a. Pemutus tegangan rendah range 0.1 sampai 1 KV.
 - b. Pemutus tegangan menengah range 1 sampai 35 KV.
 - c. Pemutus tegangan tinggi range 35 sampai 245 KV.
 - d. Pemutus tegangan extra tinggi range < 245 KV.
2. Banyaknya Mekanik Penggerak
 - a. PMT Single Pole dengan penggerak di setiap pole, PMT dengan type ini diaplikasikan di trafo induk dengan tujuan agar dapat close tiap fasa
 - b. PMT three pole mempunyai satu mekanisme untuk tiga fasa, untuk menggabungkan antar fasa, seringkali PMT type ini pada pasang di trafo, dan juga PMT 20 KV.
3. Media Isolasinya
Type pemutus bisa digolongkan menjadi:
 - a. Pemutus dengan media udara hembus (air blast)
 - b. Pemutus dengan media hampa udara (vacuum)
 - c. Pemutus dengan media Gas SF₆ (Sulphur hexofluoride)
 - d. Pemutus dengan media minyak.

1.2.16.2 Mekanisme Kerja Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus tenaga mempunyai dua posisi kerja, membuka dan menutup. Selama operasi penutupan, kontak-kontak penutup menutup melawan gaya-gaya saling berlawanan. Selama operasi pembukaan, kontak-kontak tertutup terpisah sedini mungkin.



Pada saat pemutus tenaga harus melakukan gaya-gaya yang besar pada busbar. Waktu operasi antara saat penerimaan sinyal trip dan akhir pemutusan arus orde 0,03 detik (1,5 cycle) dalam pemutus tegangan tinggi. Untuk pemutus tenaga yang digunakan dalam sistem distribusi, waktu ini sekitar 3 ms. Untuk pemutus tenaga transmisi, penutupan kontak harus cepat dengan tekanan kontak yang tinggi. Selama perjalanan kontak. Jika kondisi ini tidak terpenuhi, pengelasan

kontak dapat terjadi. Mekanisme harus mampu memberikan tugas khusus pemutus tenaga, kerja pembukaan dan penutupan.

Pemutus tenaga (PMT) 150 kV bermediakan gas SF₆ dioperasikan untuk membebaskan peralatan gardu induk pada kondisi normal atau saat kondisi gangguan agar tidak bertegangan atau sebaliknya. Pembebasan atau pemasukan tegangan pada peralatan gardu induk dinamakan manuver. Dalam proses manuver, PMT tidak bekerja sendiri tetapi ada peralatan yang dinamakan pemisah (PMS). PMS ini berfungsi untuk memisahkan peralatan yang ada di gardu induk dengan kondisi tidak berbeban. Berikut proses pengoperasian gas SF₆ yang terdiri dari pembukaan jaringan yang berarti pembebasan tegangan dan penutupan jaringan yang berarti pemberian tegangan (Goeritno, 2018).

Gas SF₆ memiliki sifat tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun dan tidak mudah terbakar. Pada temperatur diatas 150°C gas SF₆ mempunyai sifat tidak merusak metal, plastik dan bermacam-macam bahan yang umumnya digunakan dalam pemutus tenaga tegangan tinggi. Sebagai isolasi listrik, gas SF₆ mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi (2 - 3 kali dari udara) dan kekuatan dielektrik ini bertambah dengan pertambahan tekanan. Sifat lain dari gas SF₆ ialah mampu mengembalikan kekuatandielektrik dengan cepat, setelah arus bunga api listrik melalui titik nol. Pada PMT tipe tekanan tunggal, diisi gas SF₆ dengan tekanan kira-kira 5 bar. Selama pemisahan kontak-kontak, gas SF₆ ditekan kedalam suatu tabung atau silinder yang menempel pada kontak bergerak. Pada waktu pemutusan gas SF₆ ditekan melalui *nozzle* dan tiupan ini yang memadamkan busur api. Pada tipe tekanan ganda, gas dari sistem tekanan tinggi dialirkan melalui *nozzle* ke gas sistem tekanan rendah selama pemadaman busur api. Pada tipe tekanan tinggi tekanan gas kurang lebih 12 kg/cm dan pada sistem gas tekanan rendah tekanan gas kurang tekanan tinggi. (Burhanulloh, 2017).

1. Pembukaan Jaringan

Pembukaan jaringan atau pembebasan tegangan dilakukan apabila ada suatu gangguan yang terjadi pada peralatan didalam maupun diluar gardu induk atau dalam sistem transmisi, dan juga apabila akan diadakan proses pemeliharaan pada peralatan-peralatan didalam maupun diluar lingkup gardu induk. Hal yang perlu diperhatikan dalam pembukaan jaringan :

- a. PMT dioperasikan terlebih dahulu, baru kemudian pemisah-pemisahnya.
- b. Sebelum pemisah dikeluarkan atau dioperasikan harus diperiksa apakah PMT sudah terbuka sempurna, apakah amperemeter menunjukkan nol Urutan pembukaan jaringan yaitu, pertama PMT, lalu PMS busbar dibuka, selanjutnya dan PMS tanah ditutup.



ngan

gan dilakukan setelah peralatan yang ada didalam maupun lah selesai dilaksanakan pemeliharaan ataupun jaringan telah si siap diberi tegangan kembali. Hal yang perlu diperhatikan ngan :

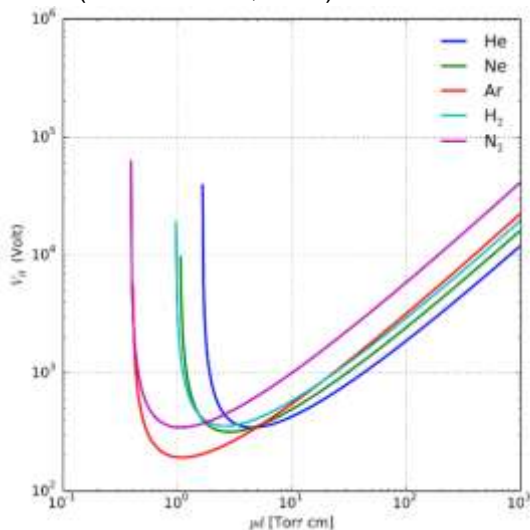
- a. PMT dioperasikan setelah pemisah-pemisahnya dimasukkan.
- b. Setelah PMT dimasukkan diperiksa apakah terjadi kebocoran isolasi (misal kebocoran gas SF₆) pada PMT.

Pemeriksaan di terminal utama dilakukan dengan melihat perbedaan suhu pada 2 (dua) titik dengan komponen/bahan yang berbeda. Perbedaan suhu antara klem dan konduktor dan perbedaan suhu antara klem dan terminal/stud utama (Effendi, 2020).

Menurut sup PLN, suhu maksimum peralatan tenaga listrik di atas 50°. Jika peralatan memiliki suhu di atas 50°, peralatan harus segera diperbaiki agar tidak terjadi kerusakan lebih lanjut (PT. PLN, 2012).

1.2.17 Hukum Paschen (Hubungan Tegangan Tembus Gas dengan Tekanan dan Jarak Elektroda)

Dalam buku *High-Voltage Insulation Technology* oleh Dieter Kind dan Hermann Karner, Hukum Paschen dibahas terkait kekuatan listrik (*electric strength*) gas sebagai salah satu fenomena kegagalan dielektrik (*breakdown*) pada isolasi tegangan tinggi. Mereka menjelaskan bahwa tegangan tembus gas sangat bergantung pada tekanan gas (p) dan jarak sela elektroda (d), karena kondisi tersebut menentukan laju tumbukan ionisasi dan *mean free path* elektron dalam gas. Kind & Karner juga menguraikan bahwa pada nilai $p \cdot d$ tertentu, terjadi tegangan minimum (*Paschen minimum*), setelah itu peningkatan lebih lanjut pada tekanan atau jarak sela justru menaikkan tegangan tembus kembali karena efek kehilangan energi ionisasi dan rekombinasi (Kind & Karner, 1985).



Grafik Kurva Paschen untuk Beberapa Jenis Gas

Sumber: *Lieberman and Lichtenberg* (2005)

*analysis of Paschen Curves for air, N₂ and SF₆ Using the *Penning Equation**” oleh Husain & Nema menjelaskan bahwa

karakteristik tegangan tembus gas SF₆ dapat dianalisis menggunakan persamaan *Townsend* untuk ionisasi beruntun. SF₆ memiliki kurva Paschen yang lebih tinggi dibanding udara dan N₂, menunjukkan kemampuan isolasinya yang sangat baik. Hal ini disebabkan sifat elektronegatif SF₆ yang efektif menangkap elektron bebas sehingga ionisasi berantai sulit terjadi, sehingga tegangan *breakdown* menjadi lebih besar. Makalah ini juga menyoroti posisi minimum kurva Paschen untuk SF₆ yang berbeda dari gas lain, serta pentingnya penggunaan koefisien *Townsend* dan koefisien emisi sekunder yang sesuai untuk memprediksi tegangan tembus SF₆ secara akurat. Analisis ini memberikan dasar teoretis yang penting bagi perancangan peralatan tegangan tinggi yang menggunakan SF₆ sebagai isolator.

1.2.18 Teori Ionisasi pada Gas Bertekanan

Ionisasi pada gas bertekanan adalah proses di mana molekul gas netral berubah menjadi ion dan elektron bebas ketika dikenai medan listrik yang cukup kuat. Elektron-elektron ini dipercepat oleh medan listrik dan menumbuk molekul gas lain, menghasilkan lebih banyak elektron dan ion dalam proses yang disebut ionisasi beruntun (*Townsend avalanche*). Jika jumlah elektron yang dihasilkan cukup besar, terjadi tegangan tembus (*breakdown voltage*), sehingga arus listrik dapat mengalir melalui gas. Tegangan tembus bergantung pada tekanan × jarak elektroda (*p-d*) sesuai dengan Hukum Paschen. Tekanan tinggi membuat molekul gas lebih rapat sehingga elektron lebih sering bertumbukan dan energi cepat hilang, sedangkan pada tekanan rendah, elektron menempuh jarak lebih jauh sebelum menumbuk, sehingga dibutuhkan tegangan lebih tinggi. Fenomena ini penting untuk desain peralatan tegangan tinggi karena menentukan batas aman tegangan listrik (Kind & Karner, 2013).

1.2.19 Teori Medan Listrik Tak Seragam (*Non-Uniform Electric Field Theory*)

Teori Medan Listrik Tak Seragam (*Non-Uniform Electric Field Theory*) menjelaskan fenomena distribusi medan listrik yang tidak merata pada sistem elektroda dengan bentuk geometris tajam atau tonjolan. Pada konfigurasi seperti ini, medan listrik lokal dapat meningkat secara signifikan di sekitar ujung-ujung elektroda atau tonjolan, sementara di daerah lain medan relatif lebih lemah. Kondisi medan yang tidak seragam ini menyebabkan percepatan elektron lebih tinggi di titik-titik dengan medan maksimum, sehingga peluang terjadinya ionisasi dan pembentukan streamer meningkat dibandingkan daerah dengan medan rendah. Fenomena ini menjadi sangat penting dalam memahami tegangan tembus dan proses *pre-breakdown* pada gas isolasi, karena distribusi medan yang lokal mendominasi inisiasi *breakdown*. Teori medan listrik tak seragam juga menjadi dasar untuk analisis jalur



angan corona, dan desain elektroda dalam sistem tegangan tinggi).

Perubahan Jarak Sela dan Tekanan

Teori Medan Listrik Tak Seragam merupakan konsep fundamental dalam *high voltage* yang menjelaskan perilaku tegangan *breakdown* pada celah dengan distribusi medan yang tidak merata, misalnya konfigurasi jarum–

jarum. Dalam medan tidak seragam, medan listrik lokal di dekat ujung elektroda tajam jauh lebih tinggi daripada medan rata-rata di sepanjang sela, sehingga proses ionisasi dan pembentukan *corona* atau *streamer* cenderung dimulai pada titik-titik dengan medan tertinggi. Berg et al. menunjukkan bahwa dalam kondisi medan tidak seragam, kriteria breakdown bukan lagi fungsi sederhana dari produk tekanan dan jarak saja, tetapi juga tergantung pada parameter geometri elektroda yang mendikte distribusi medan lokal dan gradien medan dalam gap. Hal ini berarti perubahan jarak sela elektroda sangat memengaruhi medan maksimum dan jalur ionisasi lokal, sementara perubahan tekanan hanya memengaruhi sifat gas secara makroskopik dan relatif kurang signifikan dalam kondisi medan sangat tidak seragam (M. Berg et al., 2017).

Teori Medan Listrik Tak Seragam merupakan konsep fundamental dalam *high voltage engineering* yang menjelaskan perilaku tegangan breakdown pada celah elektroda dengan distribusi medan yang tidak merata, misalnya konfigurasi jarum–jarum. Dalam medan tidak seragam, medan listrik lokal di dekat ujung elektroda tajam jauh lebih tinggi daripada medan rata-rata di sepanjang sela, sehingga proses ionisasi dan pembentukan *corona* atau *streamer* cenderung dimulai pada titik-titik dengan medan tertinggi. Berg et al. menunjukkan bahwa dalam kondisi medan tidak seragam, kriteria *breakdown* bukan lagi fungsi sederhana dari produk tekanan dan jarak saja, tetapi juga tergantung pada parameter geometri elektroda yang mendikte distribusi medan lokal dan gradien medan dalam gap. Hal ini berarti perubahan jarak sela elektroda sangat memengaruhi medan maksimum dan jalur ionisasi lokal, sementara perubahan tekanan hanya memengaruhi sifat gas secara makroskopik dan relatif kurang signifikan dalam kondisi medan sangat tidak seragam (E. Kuffel et al., 2000).

Streamer Inception (Meek Raether Criterion) memformalkan transisi dari *avalanche* menjadi *streamer*, saluran ionisasi yang bergerak cepat melalui gap. Menurut kriteria Meek–Raether, breakdown terjadi ketika jumlah elektron dari *avalanche* mencapai ambang tertentu (misal sekitar 10^8 elektron), sehingga space charge dari *avalanches* menciptakan medan tersendiri yang mempercepat ionisasi di dalam front tersebut. Raether dan Meek menemukan bahwa akibat efek space charge, *streamer* berkembang secara mandiri ketika medan lokal mencapai ambang tertentu, dan ini sangat dipengaruhi oleh distribusi medan tidak seragam. Dalam gap dengan medan tidak seragam, medan tertinggi di ujung elektroda jarum memfasilitasi pembentukan dan propagasi *streamer* lebih cepat, tetapi juga membuat panjang lintasan yang harus ditempuh oleh *streamer* menuju elektroda lawan menjadi faktor kritis. Perubahan jarak sela elektroda secara langsung memperluas atau mempersempit jalur ini, sedangkan perubahan tekanan hanya memodifikasi *attachment*, efek yang lebih kecil dibanding dampak medan (13).

yang menghubungkan tegangan breakdown dengan produk (pd), berlaku untuk medan seragam antara pelat paralel dan hubungan empiris dalam banyak teknik tegangan tinggi. Namun, menunjukkan bahwa *Paschen's law* hanya akurat dalam rentang



sementara dan tidak berlaku untuk medan sangat tidak seragam seperti elektroda jarum–jarum. Pada medan tidak seragam, breakdown tidak hanya ditentukan oleh $p \cdot d$ tetapi sangat dipengaruhi oleh faktor geometri dan distribusi medan lokal yang menyebabkan *Paschen's curve* menyimpang dari prediksi klasiknya. Oleh karena itu, dalam konfigurasi medan tidak seragam, jarak sela elektroda menjadi faktor yang lebih dominan daripada tekanan gas dalam menentukan tegangan tembus actual (Lisovskiy et al., 2017).

1.3 Penelitian Terkait

- a. Penelitian “*Experimental Investigation of the Breakdown voltage of CO₂, N₂, and SF₆ Gases, and CO₂–SF₆ and N₂–SF₆ Mixtures under Different Voltage Waveforms*” (Zhou et al., 2018) membahas karakteristik tegangan tembus berbagai jenis gas isolasi di bawah pengaruh gelombang tegangan AC, DC, dan impuls. Hasil utama penelitian tersebut menunjukkan bahwa SF₆ memiliki kekuatan dielektrik tertinggi dibandingkan CO₂ dan N₂ pada seluruh rentang tekanan dan jenis tegangan, misalnya pada tekanan sekitar 2 bar tegangan tembus SF₆ tercatat berada pada rentang ~95 kV (AC), ~115 kV (DC), dan ~126 kV (impuls), nilai yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dua gas lainnya. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa penambahan fraksi kecil SF₆ pada gas CO₂ maupun N₂ mampu meningkatkan tegangan tembus campuran secara substansial, sehingga memperkuat peran electron attachment SF₆ sebagai mekanisme utama peningkatan kekuatan dielektrik (Zhou et al., 2018). Secara teoritis, temuan tersebut konsisten dengan teori dasar isolasi gas yang menyatakan bahwa gas elektronegatif seperti SF₆ memiliki kemampuan tinggi dalam menangkap elektron bebas sehingga menurunkan koefisien ionisasi dan menghambat proses avalanche yang menjadi penyebab awal terjadinya tembus listrik. Jika dibandingkan dengan penelitian ini, yang berjudul “Uji Kinerja Isolasi Gas SF₆ terhadap Variasi Tekanan dan Jarak Elektroda pada Sistem Tegangan Tinggi”, studi Zhou et al. memberikan dasar teoretis dan empiris yang memperkuat bahwa peningkatan tekanan akan meningkatkan kekuatan dielektrik SF₆ secara hampir linier hingga titik optimum tertentu, serta bahwa perubahan geometri dan jarak sela elektroda akan memengaruhi medan listrik lokal yang selanjutnya menentukan nilai tegangan tembus. Penelitian Zhou et al. tidak secara khusus menganalisis variasi jarak elektroda seperti yang dilakukan dalam studi ini, namun hasilnya tetap relevan sebagai pembandingan untuk memvalidasi kecenderungan temuan, terutama terkait hubungan tekanan–tegangan tembus yang mengikuti prinsip Hukum Paschen, di mana produk tekanan–jarak ($p \cdot d$) menjadi faktor dominan dalam menentukan nilai $p \cdot d$ s gas. Dengan demikian, penelitian sebelumnya mendukung temuan penelitian ini, sekaligus menyediakan referensi nilai $p \cdot d$ yang dapat digunakan untuk interpretasi hasil pengujian



“*Analysis of Paschen Curves for Air, N₂ and SF₆ Using the Townsend Theory*” oleh Husain & Nema (1982) membahas secara mendalam

perilaku tegangan tembus gas berdasarkan Hukum Paschen, yaitu hubungan antara tegangan tembus dengan produk tekanan gas dan jarak sela elektroda ($p \cdot d$). Melalui analisis teoritis pendekatan ionisasi Townsend, penelitian ini menjelaskan bahwa proses *breakdown* gas tidak hanya dipengaruhi oleh kuat medan listrik, tetapi juga oleh densitas molekul gas, frekuensi tumbukan elektron, dan ketersediaan elektron awal yang memulai proses *avalanche*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap gas memiliki kurva Paschen yang berbeda, ditentukan oleh sifat ionisasi dan elektronegatif masing-masing gas. SF_6 memperlihatkan tegangan tembus yang jauh lebih tinggi dibandingkan udara maupun nitrogen pada nilai $p \cdot d$ yang sama karena sifat elektronegatifnya yang kuat, yang menyebabkan banyak elektron bebas tertangkap sebelum dapat memperkuat proses *avalanche*. Hal ini membuat pembentukan streamer menjadi lebih sulit sehingga medan kritis dan tegangan tembus meningkat. Penelitian ini juga menegaskan bahwa terdapat titik minimum Paschen, yaitu kondisi $p \cdot d$ tertentu di mana tegangan tembus paling rendah; di bawah atau di atas titik ini, tegangan tembus kembali meningkat karena proses ionisasi tidak berlangsung optimal. Temuan ini menjadi landasan teori fundamental dalam studi isolasi gas karena memperlihatkan bagaimana tekanan dan jarak sela elektroda secara langsung menentukan kemampuan gas untuk menahan tegangan tinggi. Dalam penelitian ini yang berjudul, “Uji Kinerja Isolasi Gas SF_6 terhadap Variasi Tekanan dan Jarak Elektroda pada Sistem Tegangan Tinggi”, hasil Husain & Nema memberikan kerangka teoritis kuat untuk memahami hasil uji tegangan tembus SF_6 . Secara teoritis, semakin tinggi tekanan SF_6 , semakin besar tegangan tembus akibat meningkatnya laju penangkapan elektron; sementara perubahan jarak sela akan mengubah nilai $p \cdot d$ sehingga memengaruhi posisi titik operasi pada kurva Paschen. Dengan demikian, penelitian Husain & Nema menjadi acuan untuk membandingkan apakah hasil eksperimen berada dalam tren yang konsisten dengan teori Paschen dan perilaku gas elektronegatif seperti SF_6 .

- c. Penelitian yang dilakukan oleh Onal (2018) berjudul “*Breakdown Mechanism of Different Sulphur Hexafluoride Gas Mixtures*” mengkaji karakteristik dan mekanisme *breakdown* pada gas isolasi berbasis SF_6 serta berbagai campuran SF_6 dengan gas lain (seperti N_2 , CO_2 , dan udara) di bawah tegangan AC dan konfigurasi medan listrik non-uniform. Studi ini menunjukkan bahwa sifat dasar mekanisme *breakdown* pada SF_6 sangat dipengaruhi oleh kemampuan gas tersebut dalam melakukan penangkapan elektron (electron attachment), yang menjadikan SF_6 memiliki kekuatan dielektrik tinggi dan stabil dibandingkan gas lain.



lain. Dalam campuran gas, dominasi sifat elektronegatif SF_6 berperan penting, dan gas non-elektronegatif mengurangi efisiensi penangkapan elektron dan menurunkan kemampuan isolasinya dibandingkan SF_6 murni. Onal menekankan bahwa fenomena *breakdown* pada SF_6 dan campuran ditentukan oleh interaksi antara medan listrik lokal, densitas molekul gas, frekuensi tumbukan elektron, tingkat ionisasi, dan efisiensi proses penangkapan elektron. Medan listrik non-uniform, seperti konfigurasi elektroda tajam,

intensifikasi medan di sekitar ujung elektroda mempercepat awal pembentukan avalanse dan streamer, sehingga nilai tegangan tembus cenderung lebih rendah dibandingkan pada medan uniform. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa meskipun campuran gas yang mengandung fraksi kecil SF₆ tetap menunjukkan peningkatan sifat isolasi dibandingkan gas dasar, performanya tetap berada di bawah SF₆ murni, menunjukkan bahwa kemampuan SF₆ dalam menekan pertumbuhan avalanse sangat sensitif terhadap perubahan komposisi gas. Temuan Onal (2018) juga menegaskan bahwa karakteristik *breakdown* bergantung secara signifikan pada tekanan gas, di mana peningkatan tekanan meningkatkan densitas molekul dan memperbesar probabilitas tumbukan, sehingga memperkuat proses penangkapan elektron dan meningkatkan tegangan tembus. Dengan demikian, konstanta dielektrik dan kekuatan isolasi pada SF₆ tidak hanya ditentukan oleh sifat gas murni, tetapi juga oleh kondisi operasional dan konfigurasi medan listrik. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan landasan teoritis penting bahwa mekanisme *breakdown* SF₆ merupakan hasil kompetitif antara proses ionisasi dan proses *attachment*, yang dikendalikan oleh tekanan, komposisi gas, geometri elektroda, dan non-uniformitas medan listrik. Penelitian Onal (2018) menekankan bahwa performa isolasi gas dipengaruhi oleh komposisi gas, tekanan, densitas molekul, serta distribusi medan listrik terutama pada konfigurasi medan tidak seragam. Studi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tekanan akan menaikkan densitas molekul sehingga proses ionisasi menjadi lebih sulit sementara proses penangkapan elektron oleh molekul-molekul elektronegatif seperti SF₆ meningkat, sehingga tegangan tembus juga bertambah. Temuan ini berkaitan erat dengan penelitian “Uji Kinerja Isolasi Gas SF₆ terhadap Variasi Tekanan dan Jarak Elektroda pada Sistem Tegangan Tinggi”, karena penelitian tersebut secara langsung menguji bagaimana tekanan dan variasi jarak elektroda memengaruhi karakteristik tembusnya SF₆.

- d. Penelitian berjudul “Stability of *Breakdown* Phenomenon in N₂, SF₆, and Their Mixture Under Impulse Voltages” yang dilakukan oleh Geng, Yang, Shu, Cheng, dan Chen (2023), menunjukkan bahwa karakteristik tembus listrik pada gas N₂, SF₆, serta campurannya sangat dipengaruhi oleh dinamika ionisasi awal, kestabilan pertumbuhan streamer, dan interaksi antara elektron bebas dengan ion negatif dalam medan yang tidak seragam¹. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa campuran gas 15 persen SF₆ dalam nitrogen menghasilkan tegangan tembus yang lebih stabil dibandingkan gas murni, ditandai dengan rentang nilai *breakdown* yang lebih sempit serta pola rona yang lebih terkontrol. Mekanisme pembentukan ion negatif da terbukti menghambat perkembangan streamer negatif s avalanche menjadi lebih konsisten dan tidak mudah njadi tembus penuh. Penelitian ini menegaskan bahwa s tembus sama pentingnya dengan nilai puncak tegangan kestabilan tersebut menentukan reliabilitas sistem isolasi kondisi impuls yang cepat dan bergantung pada distribusi



medan. Jika dibandingkan dengan penelitian ini yang berjudul “Uji Kinerja Isolasi Gas SF₆ terhadap Variasi Tekanan dan Jarak Elektroda pada Sistem Tegangan Tinggi”, penelitian sebelumnya memberikan dasar bahwa perubahan parameter fisik seperti tekanan dan jarak elektroda tidak hanya mempengaruhi nilai tegangan tembus tetapi juga berpengaruh pada kestabilan proses ionisasi dan penyebaran nilai *breakdown*. Variasi tekanan dalam SF₆ murni dapat memperkuat mekanisme penangkapan elektron melalui peningkatan densitas molekul, namun kestabilannya tetap dipengaruhi oleh tingkat non-uniformitas medan akibat perubahan jarak sela. Dengan demikian, selain menganalisis tren kenaikan atau penurunan tegangan tembus, penelitian kamu juga penting untuk melihat konsistensi nilai *breakdown* guna memahami bagaimana SF₆ berperilaku dalam kondisi medan yang berbeda. Wawasan dari penelitian sebelumnya memperkuat pemahaman bahwa desain isolasi gas SF₆ dalam peralatan tegangan tinggi harus mempertimbangkan mekanisme ionisasi awal, ruang muatan, serta kecenderungan terbentuknya *streamer*, baik dalam kondisi DC, AC, maupun impuls.

- e. Penelitian Yan, Fang & Liu (1997) menyelidiki perilaku isolasi pada gas SF₆ yang telah membentuk plasma residual panas (~ 3000 K) setelah terjadinya pelepasan listrik (*arc*), yaitu sebuah kondisi realistik yang mungkin muncul pada peralatan tegangan tinggi setelah pemadaman busur. Mereka menganalisis apakah plasma *residual* tersebut tetap mempertahankan sifat isolasi atau mengalami *breakdown* lebih mudah dibanding gas SF₆ murni pada kondisi normal. Karena plasma *residual* memiliki konsentrasi ion dan elektron bebas, serta populasi partikel bermuatan, kondisi ini berbeda dibanding gas netral: muatan ruang (*space-charge*) dan distribusi partikel bermuatan mempengaruhi medan listrik lokal dan jalur ionisasi. Studi ini menemukan bahwa kemampuan dielektrik (tegangan/medan tembus) dalam kondisi plasma residual pada suhu tinggi dapat menurun, tergantung pada kondisi termal, densitas partikel bermuatan, dan riwayat *discharge* sebelumnya. Dengan demikian, mereka menunjukkan bahwa efek “*memory*” dari gas/plasma, yakni adanya muatan residual, ion, dan kondisi suhu harus dipertimbangkan ketika menilai kinerja isolasi setelah peristiwa *discharge* atau busur. Hasil ini menekankan bahwa isolasi gas SF₆ bukan hanya soal densitas gas dan jarak elektroda, melainkan juga kondisi fisik-kimia gas saat dan setelah *discharge*, termasuk efek residual ionisasi dan plasma panas. Penelitian saya ini menguji kinerja isolasi gas SF₆ berdasarkan dua parameter utama: tekanan gas dan jarak elektroda. Studi Yan, Fang & Liu (1997) menambah kedalaman analisis dengan menekankan bahwa muatan residual dan kondisi plasma residual juga mempengaruhi kekuatan isolasi. Pada percobaan itu, meskipun percobaan ini mungkin dilakukan dalam kondisi “*fresh*” (tanpa *discharge* awal), hasil dan interpretasinya perlu mempertimbangkan kemungkinan efek residual ionisasi jika terjadi pra-*discharge* sebelumnya, terutama jika dalam aplikasi praktis gas SF₆ mengalami siklus pemadaman.



1.4 Rumusan Masalah

Gas SF₆ banyak digunakan sebagai isolasi pada peralatan tegangan tinggi karena memiliki kemampuan dielektrik yang tinggi dan stabilitas yang baik. Namun, performa isolasi gas ini dipengaruhi oleh kondisi operasional seperti tekanan dan jarak elektroda, yang menentukan nilai tegangan tembus. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk mengetahui pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kinerja isolasi SF₆. Berdasarkan hal tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik tegangan tembus gas SF₆ pada sistem tegangan tinggi?
2. Bagaimana pengaruh variasi tekanan SF₆ terhadap nilai tegangan tembus?
3. Bagaimana pengaruh jarak elektroda terhadap performa isolasi SF₆?
4. Bagaimana kombinasi tekanan dan jarak elektroda memengaruhi kemampuan isolasi SF₆?
5. Bagaimana hasil penelitian ini dapat menjadi acuan dalam desain isolasi berbasis SF₆?

1.5 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik kinerja isolasi gas SF₆ terhadap perubahan tekanan dan jarak sela antar elektroda pada sistem tegangan tinggi. Secara khusus, tujuan yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Menentukan karakteristik tegangan tembus gas SF₆ pada sistem tegangan tinggi.
2. Menganalisis pengaruh variasi tekanan gas SF₆ terhadap nilai tegangan tembus.
3. Menganalisis pengaruh jarak elektroda terhadap kinerja isolasi gas SF₆.
4. Mengkaji hubungan antara kombinasi tekanan dan jarak elektroda terhadap performa isolasi gas SF₆.
5. Memberikan rekomendasi nilai parameter yang dapat digunakan sebagai acuan dalam perancangan sistem isolasi berbasis SF₆ pada peralatan tegangan tinggi.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik dari segi akademis maupun praktis, antara lain sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis

- a. Memberikan kontribusi ilmiah berupa data eksperimen mengenai pengaruh tekanan dan jarak elektroda terhadap tegangan tembus gas SF₆ pada sistem tegangan tinggi.



Referensi tambahan bagi mahasiswa, peneliti, atau akademisi ang teknik tegangan tinggi dan sistem isolasi gas.

ing pengembangan teori dan kajian lebih lanjut terkait tik isolasi gas dan optimasi sistem isolasi pada peralatan

2. Manfaat Praktis

- a. Memberikan informasi teknis yang dapat digunakan dalam perancangan dan penentuan parameter kerja gas SF₆ pada peralatan tegangan tinggi.
- b. Mendukung peningkatan keandalan dan keselamatan sistem tenaga listrik melalui pemilihan parameter isolasi yang lebih tepat.
- c. Menjadi acuan dalam pengembangan standar operasional atau evaluasi performa isolasi berbasis SF₆ pada industri tenaga listrik.

1.7 Ruang Lingkup

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada tujuan yang ingin dicapai, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada beberapa hal berikut:

1. Penelitian hanya difokuskan pada pengujian kinerja isolasi gas SF₆ murni (tanpa campuran gas lain) terhadap variasi tekanan.
2. Variasi tekanan gas SF₆ yang digunakan dibatasi pada rentang tekanan tertentu (yaitu 0,4 bar; 1 bar), sesuai dengan kemampuan peralatan uji di laboratorium.
3. Pengujian dilakukan pada sistem tegangan tinggi AC (*alternating current*) dengan bentuk gelombang sinusoidal.
4. Parameter utama yang diamati adalah tegangan tembus (*breakdown voltage*) akibat variasi tekanan gas.
5. Penelitian dilakukan dalam kondisi temperatur ruang laboratorium yang relatif konstan, sehingga pengaruh suhu terhadap performa isolasi tidak dianalisis secara mendalam.
6. Pengujian difokuskan hanya pada konfigurasi elektroda jarum-jarum karena sensitif untuk mendeteksi awal terjadinya pelepasan muatan dan menentukan tegangan tembus gas SF₆ secara lebih akurat. Adapun jarak sela antar elektroda yang digunakan yaitu 0,5 cm; 1 cm; 1,5 cm; 2 cm.
7. Aspek lingkungan seperti dampak emisi SF₆ terhadap lingkungan hanya dibahas secara teoritis, tidak menjadi fokus eksperimen utama.
8. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dijadwalkan dimulai pada bulan Desember 2024 dan berakhir pada bulan November 2025. Di sisi lain, proses penulisan proposal dimulai pada bulan Maret 2024. Penelitian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang beralamatkan di Jl. Malino No.Km.6, Romang Lompoa, Kec. Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171.

2.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian adalah elemen yang diukur, dimanipulasi, atau dikontrol dalam suatu penelitian untuk menguji hubungan antarvariabel. Secara umum, terdapat tiga jenis variabel utama: variabel bebas (*independent*), variabel terikat (*dependent*), dan variabel kontrol (*controlled*).

1. Variabel Bebas (*Independent Variables*)

Variabel bebas adalah variabel yang diubah atau divariasikan untuk melihat pengaruhnya terhadap hasil pengujian. Dalam penelitian ini, variabel bebasnya adalah:

- Tekanan gas SF₆ (0,4 bar, 1 bar)
- Jarak sela elektroda (0,5 cm, 1 cm, 1,5 cm, 2 cm)

Kedua variabel ini divariasikan untuk melihat bagaimana perubahan tekanan dan jarak sela memengaruhi kemampuan isolasi gas SF₆.

2. Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas.

Dalam penelitian ini, variabel terikatnya adalah:

- Tegangan tembus (*Breakdown voltage*)

Nilai tegangan tembus akan berubah sesuai dengan variasi tekanan dan jarak sela elektroda yang diberikan.

3. Variabel Kontrol (*Controlled Variables*)

Variabel kontrol adalah faktor yang dijaga konstan agar tidak memengaruhi hasil penelitian. Dalam penelitian ini, variabel kontrol meliputi:

- Jenis gas isolasi yang digunakan (SF₆ murni)
- Bentuk dan bahan elektroda (misalnya elektroda jarum–jarum dari bahan logam konduktif yang sama)
- Subur ruang pengujian (dijaga konstan selama percobaan)
- laju tegangan (*rate of voltage rise*) saat pengujian

l-variabel ini tetap konstan guna memastikan bahwa perubahan ar-benar disebabkan oleh variasi tekanan dan jarak sela, bukan



2.3 Alat dan Bahan Penelitian

Beberapa alat dan bahan yang digunakan pada penelitian yang dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin sebagai berikut:

2.3.1 Bahan Penelitian

1. Gas SF₆ (Sulfur Heksafluorida)

Gas SF₆ sebagai objek utama penelitian yang diuji sebagai isolator dalam sistem tegangan tinggi.



Gambar 10 Gas SF₆

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

2.3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan Penelitian yang digunakan berupa :

1. Trafo Uji

Trafo uji ini berfungsi untuk menghasilkan tegangan tinggi yang diperlukan dalam pengujian tegangan tembus gas SF₆ dan memberikan tegangan AC yang stabil hingga 100 kV untuk menguji isolasi gas di dalam tabung pengujian.





Gambar 11 Trafo Pengujian Tegangan Tinggi

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

Tabel 2 Spesifikasi Teknis Trafo Uji

Spesifikasi Teknis Trafo Uji	
Tipe	HV9105
No. Seri	T-16572
Tegangan Primer	0 – 220 V
Tegangan Sekunder	0 – 100 kV
Arus Primer	15,1 A
Arus Sekunder	50 Ma
Daya Output	5 KVa – Kontinu
Vektor Grup	7
Pendinginan	ON
Frekuensi	50 Hz
Tegangan Impedansi	4,9 %

Sumber: Manjang, 2023

2. Meja Kontrol (*Control Desk*)

Control Desk berfungsi sebagai pusat kontrol untuk mengoperasikan peralatan pengujian dan Menyediakan pengaturan tegangan, arus, dan pengendalian proses





Gambar 12 Meja Kontrol Pengujian Tegangan Tinggi

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

Tabel 3 Spesifikasi Teknis Meja Kontrol

Spesifikasi Teknis Trafo Uji	
Tipe	HV9103
No. Seri	D-16320
Rating Tegangan	220KV
Rating KVA	5
Frekuensi	50 Hz
Berat	275 kg

Sumber: Manjang, 2023



Optimized using
trial version
www.balesio.com

3. Tabung Gas SF₆

Tabung gas sebagai tempat gas SF₆ yang akan digunakan yang diuji di bawah kondisi tertentu (suhu dan tekanan). Tabung ini dilengkapi dengan elektroda untuk menciptakan medan listrik.



Gambar 13 Tabung Gas SF₆

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

4. Resistor

Membatasi arus listrik selama proses pengujian untuk melindungi peralatan dan mengurangi dampak lonjakan arus akibat pelepasan muatan.



Gambar 14 Resistor

Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin



Tabel 4 Spesifikasi Charging Resistor

Spesifikasi Charging Resistor	
Tipe	HV9121
Tegangan Impuls	140 kV
Perlawanan	10 M Ω
Panjang/Tinggi	743 mm
Bobot	5 kg

Sumber: Manjang, 2023

5. *Connecting Rod, Aluminium*

Konektor sebagai penghubung (elemen koneksi konduktif) berbagai komponen dalam rangkaian pengujian, seperti trafo uji, tabung pengujian, dan meja kontrol.

**Gambar 15 Connecting Rod**

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

Tabel 5 Spesifikasi Teknis Connecting Rod

Spesifikasi Teknis Connecting Rod, Aluminium	
Tipe	HV9108
Panjang	743 mm
Berat	1 kg

Sumber: Manjang, 2023

6. *Connecting Cup, Aluminium*

Connecting cup adalah komponen mekanis berbentuk “cawan” (cup) yang digunakan sebagai penyambung (connector) dan penjepit (holder) pada rangkaian pengujian tegangan tinggi.





Gambar 16 Connecting Cup

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

Tabel 6 Spesifikasi Teknis Connecting Cup

Spesifikasi Teknis <i>Connecting Cup</i> , Aluminium	
Tipe	HV9109
Dimensi	Ø 157 x h 86 mm
Berat	2,2 kg

Sumber: Manjang, 2023

7. Floor Pedestal

Merupakan elemen konduktif untuk memasang hingga empat batang pengatur jarak secara horizontal dan menopang satu komponen secara vertikal.



Gambar 17 Floor Pedestal

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin



Tabel 7 Spesifikasi Teknis *Floor Pedestal*

Spesifikasi Teknis <i>Floor Pedestal</i>	
Tipe	HV9110
Dimensi	200 x 200 x 80 mm
Berat	2 kg

Sumber: Manjang, 2023

8. *Measuring Capacitor*

Kapasitor ini berfungsi sebagai pembagi tegangan tinggi untuk pengukuran tegangan AC.

**Gambar 18 *Measuring Capacitor***

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

Tabel 8 Spesifikasi *Measuring Capacitor*

Spesifikasi <i>Measuring Capacitor</i>	
Tipe	HV9141
Tegangan AC	100 kV
Kapasitansi	100 pF
Panjang/Tinggi	743 mm
Berat	9 kg



ngsi sebagai terminal untuk mengalirkan arus listrik atau an listrik di dalam media yang diuji. Penggunaan elektroda penelitian ini memberikan beberapa keuntungan penting.

Elektroda dengan ujung tajam menghasilkan distribusi medan listrik yang tidak seragam (non-uniform), di mana konsentrasi medan listrik tertinggi berada di ujung jarum. Kondisi ini memudahkan terjadinya loncatan listrik (*breakdown*) pada tegangan yang lebih rendah, sehingga fenomena tembus listrik dapat diamati dengan lebih jelas. Selain itu, konfigurasi jarum-jarum juga sangat sensitif terhadap perubahan tekanan dan jarak sela, sehingga pengaruh kedua parameter tersebut terhadap tegangan tembus dapat terdeteksi dengan lebih akurat.



Gambar 19 Elektroda Jarum

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

10. *Vacuum Pump Machine*

Pompa vakum digunakan untuk mengosongkan ruang uji sebelum dan sesudah pengisian gas SF₆, yaitu dengan mengeluarkan udara, uap air, dan sisa gas dari pengujian sebelumnya. Proses vakum ini memastikan ruang menjadi bersih, kering, dan bebas kontaminasi sehingga tekanan SF₆ dapat diatur dengan akurat dan hasil pengujian tegangan tembus menjadi lebih stabil, valid, dan dapat diulang.



Gambar 20 Vacuum Pump Machine

atorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin



im and Pressure (DKU)

yang dapat menahan tekanan tinggi maupun vakum untuk digunakan untuk mengatur dan mempertahankan tekanan



Gambar 21 Vessel for Vacuum and Pressure (DKU)

Sumber: Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin

Tabel 9 Spesifikasi Teknis Vessel for Vacuum and Pressure (DKU)

Spesifikasi Teknis Vessel for Vacuum and Pressure (DKU)	
Tipe	HV9134
Kecepatan Pemompaan Nominal	11 m ³ /jam (50 Hz), 13 m ³ /jam (60 Hz)
Tekanan Parsial Pamungkas Tanpa Pemberat Gas	<1,5 mbar (50 Hz), <1,5 mbar (60 Hz)
Daya Motor	0,55 kw (50 Hz) , 0,65 kw (60 Hz)
Redup	320 x 270 x 220 mm
Berat dengan Minyak Mineral	20 g (50 Hz, 60 Hz)

Sumber: Manjang, 2023

12. Regulator Tekanan

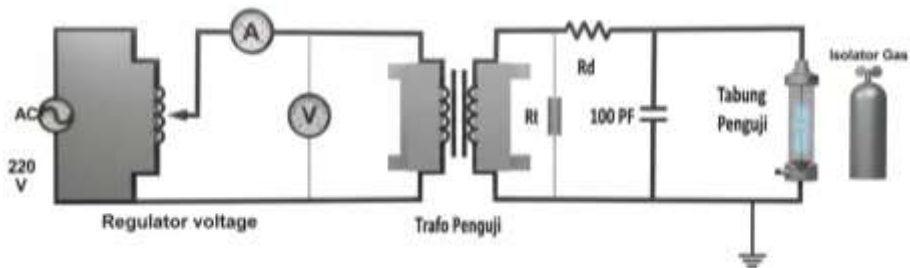
Regulator tegangan diperlukan untuk mengatur dan menstabilkan tegangan keluaran selama pengujian agar kenaikan tegangan menuju kondisi tembus listrik dapat terkontrol dan terkendali.



digunakan untuk mengatur aliran fluida (gas atau cairan) tekanannya secara signifikan saat fluida melewati pembukaan bit dalam katup. Proses ini tidak melibatkan pertukaran panas

dengan lingkungan, sehingga sering dianggap sebagai proses adiabatik.

Rangkaian Pengujian



Gambar 22 Single Line Diagram Pengujian Tegangan Tembus AC Bahan Isolasi Gas

Sumber: Manjang, 2023

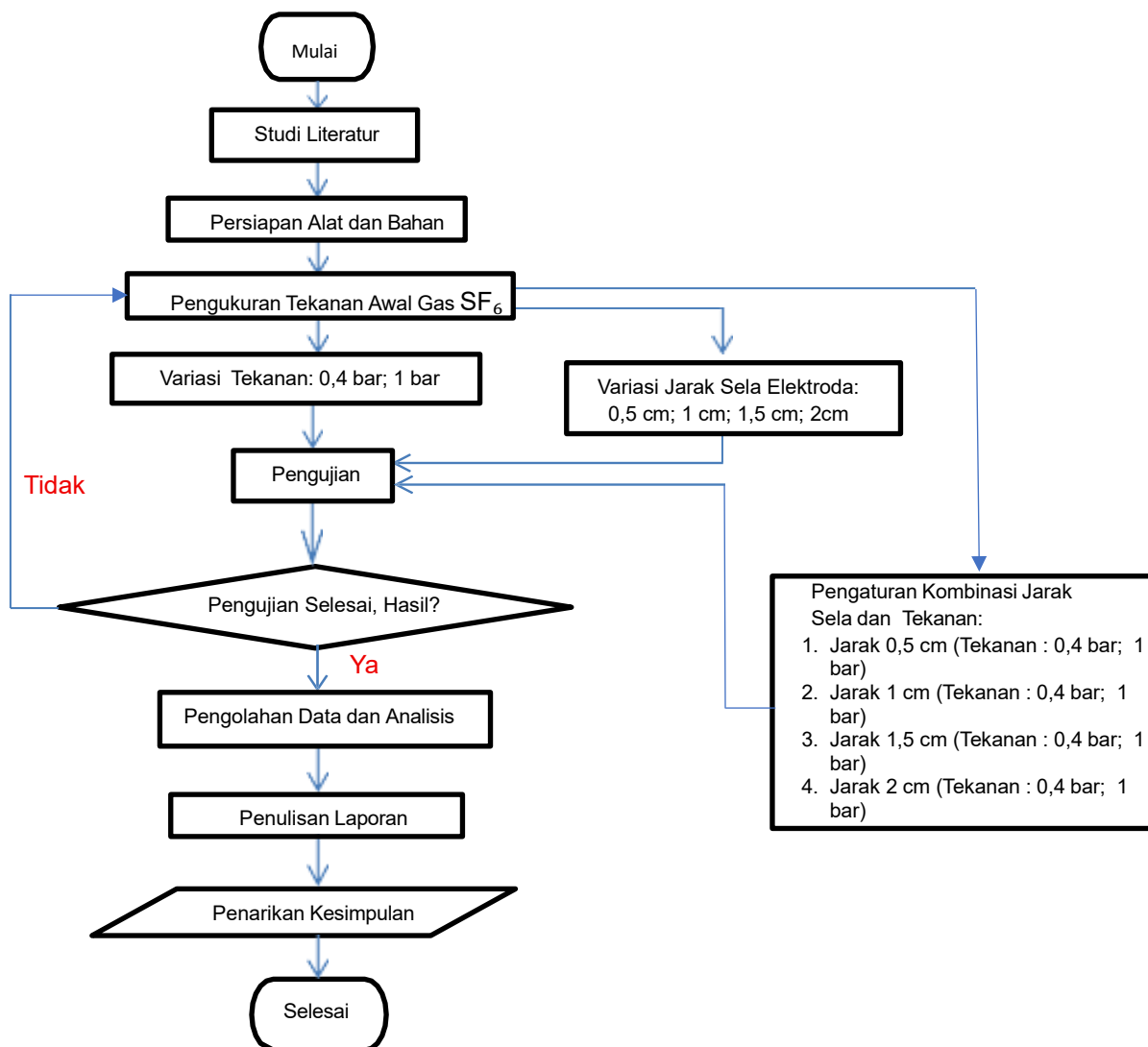


Gambar 23 Gambar Rangkaian Pengujian Tegangan Tembus AC Bahan Isolasi Gas

atorium Teknik Tegangan Tinggi, Universitas Hasanuddin



2.4 Tahapan Penelitian



Gambar 24 Bagan Alir Penelitian

Penjelasan dari bagan tahapan penelitian di atas adalah sebagai berikut:



1. Mengumpulkan dan mengkaji sumber-sumber ilmiah yang berkaitan dengan karakteristik fisik dan kimia SF_6 , seperti kekuatan dielektrik, dan risiko lingkungan.

2. Menyiapkan Bahan: persiapan peralatan dan bahan yang diperlukan.

3. Menyiapkan Alat: alat seperti ruang uji tegangan tinggi, alat pengukuran dalam kondisi baik dan dikalibrasi untuk memastikan ketepatan pengukuran.

4. Bahan utama, yaitu gas SF_6 dengan tingkat

kemurnian yang stabil, juga disiapkan. Elektroda yang akan digunakan diperiksa untuk memastikan tidak ada kerusakan atau kontaminasi yang dapat memengaruhi hasil pengujian.

3. Pengukuran Tekanan Awal Gas: untuk memastikan bahwa tekanan awal gas sesuai dengan kondisi eksperimen yang telah direncanakan.
4. Tahapan Parameter Pengujian
 - a. Variasi Tekanan: 0,4 bar ; 1 bar
 - b. Variasi Jarak Sela Elektroda: 0,5 cm ; 1 cm ; 1,5 cm ; 2 cm
 Pengaturan Kombinasi Jarak Sela dan Tekanan:
 1. Jarak 0,5 cm (Tekanan : 0,4 bar ; 1 bar)
 2. Jarak 1 cm (Tekanan : 0,4 bar ; 1 bar)
 3. Jarak 1,5 cm (Tekanan : 0,4 bar ; 1 bar)
 4. Jarak 2 cm (Tekanan : 0,4 bar ; 1 bar)
5. Pengujian Selesai, Hasil?: hasil pengujian dianalisis untuk menentukan apakah kinerja gas SF₆ memenuhi kriteria.
 - a. Jika “Ya” : Gas SF₆ menunjukkan stabilitas performa di berbagai rentang suhu dan tekanan yang diuji.
 - b. Jika “Tidak” : Performa menurun tajam pada suhu atau tekanan tertentu, menunjukkan ketidakcocokan untuk kondisi operasional tersebut.
6. Pengolahan Data dan Analisis: Menganalisis data yang diperoleh dari pengujian.
7. Penulisan Laporan: Hasil penelitian disusun dalam bentuk laporan yang mencakup latar belakang, metode, hasil, analisis, dan pembahasan.
8. Penarikan Kesimpulan: menarik kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang mencakup apakah gas SF₆ memenuhi kriteria sebagai isolator dalam kondisi tekanan tertentu.

2.5 Metode Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan pada penelitian ini merupakan data primer, karena diperoleh langsung dari hasil pengujian atau eksperimen yang dilakukan langsung di Laboratorium Tegangan Tinggi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin melalui pengukuran tegangan tembus pada berbagai variasi tekanan dan jarak elektroda.

2.5.1 Studi Literatur

Tahap ini dilakukan dengan mempelajari berbagai sumber seperti jurnal, buku, dan laporan penelitian terdahulu yang membahas sifat isolasi gas SF₆, pengaruh tekanan terhadap tegangan tembus, serta konfigurasi elektroda pada sistem lainnya adalah untuk memperoleh dasar teori yang kuat sebagai acuan dan pelaksanaan eksperimen.



Alat dan Bahan

Dilakukan pengecekan dan penyiapan seluruh peralatan yang seperti generator tegangan tinggi, ruang uji bertekanan, busbar, serta sistem pengisian gas SF₆. Selain itu, dilakukan juga

kalibrasi alat ukur dan pemeriksaan kebocoran pada ruang uji agar hasil pengukuran akurat serta aman digunakan.

2.5.3 Elektroda yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan **konfigurasi elektroda jarum-jarum**, karena bentuk ujungnya yang runcing mampu menghasilkan medan listrik tak seragam, sehingga memudahkan terbentuknya pelepasan muatan dan mempermudah pengamatan fenomena awal tembus listrik. Elektroda diatur dengan variasi jarak 0,5; 1; 1,5; dan 2 cm untuk mengetahui pengaruh jarak terhadap nilai tegangan tembus gas SF₆.

2.5.4 Mengatur Variasi Tekanan Gas SF₆

Tekanan gas SF₆ divariasikan menggunakan regulator tekanan untuk menghasilkan kondisi yang berbeda. Hal ini memungkinkan analisis hubungan tekanan dengan tegangan tembus dan kapasitas isolasi gas.

2.5.5 Menguji Tegangan Tembus

Tegangan maksimum yang dapat ditahan gas SF₆ sebelum terjadi kegagalan isolasi diuji dengan alat uji tegangan tinggi. Data tegangan tembus memberikan informasi tentang batas kemampuan isolasi gas dalam berbagai kondisi.

2.6 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian ini adalah (Manjang, 2023):

1. Masuk ke dalam ruang pengujian dengan mengambil tongkat grounding untuk menggrounding seluruh peralatan yang berada di dalam sangkar terlebih dahulu.
2. Buat rangkaian tegangan tinggi sesuai Gambar percobaan.
3. Setelah rangkaian tegangan tinggi sudah selesai, tutup pagar sangkar uji dan tongkat grounding dikeluarkan dari sangkar. Masukkan tegangan pada control desk
4. Aktifkan control desk dengan memutar ke kanan kunci Control Switch dan Main Switch pada Control Desk
5. Setting jarak sela elektroda (elektroda jarum-jarum).
6. Masukkan gas yang telah diatur tekanannya ke tabung pengujian menggunakan regulator sesuai dengan tekanan yang diinginkan.
7. Tutup switch primer ON (S1). Periksa tegangan pada Voltmeter, pastikan bahwa tegangan berada pada posisi nol (jika belum, turunkan regulator tegangan sampai posisi nol).



under ON (S2).

tor tegangan secara bertahap dengan kecepatan 1 kV/detik
bung pengujian.

tabung pengujian tembus, buka switch sekunder (OFF). Catat
sar tegangan pada voltmeter serta penunjukan arus pada

11. Turunkan regulator tegangan TP sampai nol.
12. Kosongkan gas pada tabung pengujian dengan menggunakan *vacuum pump*.
13. Buka switch primer (OFF).
14. Ulangi Prosedur 6 untuk ukuran tekanan dan jarak sela yang berbeda
15. Setelah selesai, matikan sumber tegangan control desk.
16. *Ground*/tanahkan semua terminal komponen di dalam ruang instalasi tegangan tinggi terutama pada kapasitor (Cs) dengan menggunakan tongkat grounding.
17. Letakkan tongkat *grounding* pada trafo pengujian setelah semua percobaan telah selesai.

Berdasarkan standar IEC 60060 (*High-voltage test techniques*), pengujian kemampuan isolasi gas SF₆ dilakukan melalui serangkaian tahapan yang terkontrol untuk memperoleh nilai tegangan tembus yang representatif dan dapat direproduksi. Pengujian diawali dengan persiapan sistem uji yang terdiri dari sumber tegangan tinggi, transformator tegangan tinggi, ruang uji bertekanan, elektroda dengan konfigurasi dan jarak sela tertentu, serta peralatan ukur dan proteksi, di mana seluruh komponen dipastikan bersih dari kelembapan, partikel, dan ketidakseragaman yang dapat memengaruhi hasil uji. Gas SF₆ dengan kemurnian tinggi kemudian dimasukkan ke dalam ruang uji hingga mencapai tekanan yang ditentukan dan dibiarkan stabil agar distribusi tekanan dan temperatur seragam. Tegangan tinggi diterapkan menggunakan metode kenaikan bertahap (*step-by-step*) atau kenaikan kontinu, dengan metode bertahap lebih umum digunakan karena mampu meminimalkan pengaruh transien dan menghasilkan data yang lebih stabil, di mana tegangan dinaikkan secara bertingkat dengan selang waktu tertentu hingga terjadi tembus yang ditandai oleh loncatan listrik atau penurunan tegangan secara tiba-tiba. Untuk menjamin keandalan statistik, pengujian dilakukan berulang pada kondisi yang sama dengan interval waktu antarpengujian guna menghilangkan efek sisa ionisasi, dan nilai tegangan tembus ditentukan sebagai nilai rata-rata dari seluruh hasil pengujian. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis dalam bentuk karakteristik tegangan terhadap tekanan dan jarak sela elektroda dengan mempertimbangkan pengaruh konfigurasi medan listrik, sehingga karakteristik kemampuan isolasi gas SF₆ dapat dievaluasi secara sistematis sesuai ketentuan IEC 60060.

2.7 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dalam penelitian " Uji Kinerja Isolasi Gas Sf₆ Terhadap Variasi Tekanan Pada Sistem Tegangan Tinggi" menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi hubungan antara parameter tekanan, jarak sela elektroda, dan tegangan tembus (*breakdown voltage*). Pendekatan ini mencakup langkah-langkah



...if
 ...eroleh dari pengujian, langkah pertama adalah menganalisis nilai-nilai tekanan, jarak sela elektroda, dan tegangan tembus. ...im dalam bentuk tabel, grafik, atau diagram untuk memberikan ...ngan umum antar parameter.

2. Interpretasi Data dan Kesimpulan

Analisis dilakukan untuk menilai sejauh mana tekanan dan jarak sela elektroda memengaruhi kinerja gas SF₆ sebagai isolator. Temuan ini kemudian diterjemahkan ke dalam rekomendasi praktis untuk penggunaan SF₆ di sistem tegangan tinggi. Dengan pendekatan matematis ini, penelitian tidak hanya menghasilkan data eksperimental, tetapi juga menyusun model prediktif yang dapat diaplikasikan pada sistem kelistrikan nyata.

