

Karakteristik Dielektrik Campuran Gas Karbondioksida (CO₂) Dengan Nitrogen (N₂) Dibawah Terpaan Medan Tinggi DC Polaritas Negatif

Yansyah Prasetyo*, Fri Murdiya**

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Riau
Kampus Bina widya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Email: prasetyoyansyah@gmail.com

ABSTRACT

Gas insulating material commonly used in electrical system is SF₆ gas. SF₆ gas is used as an insulator material in electrical system in transfer heat. However, SF₆ gas is not environmentally friendly, and triggers the increase of global warming so it is necessary to conduct research to get other gas insulators as alternative materials such as gas Carbondioxide (CO₂) and Nitrogen (N₂). This study discusses the dielectric characteristics of a mixture of Carbondioxide (CO₂) gas with Nitrogen (N₂) under electrical stress (high voltage negative polarity). The study used spherical electrodes and needles with varying gap distances and we compared the gas breakdown voltage with ratio 25% CO₂ : 75% N₂, 50% CO₂ : 50% N₂, and 75% CO₂ : 25% N₂ respectively. The purpose this research is to find the maximum breakdown voltage for several ratio gases. From the test result obtained breakdown voltage in negative polarity is smaller than positive polarity. We also attempted the gases breakdown voltage 70 trials and it was indicated that the breakdown voltage varied -78,69 kV until -105 kV. The maximum discharge current recorded by an oscilloscope was -104 A in 50% CO₂ : 50% N₂ ratio.

Keywords : *electrode, mixture insulation gas, polarity efect, dielectric power, negative polarity, breakdown voltage*

1. PENDAHULUAN

Gas atau udara merupakan salah satu unsur yang paling mudah di temukan dalam kehidupan sehari-hari. Banyak peralatan yang menggunakan gas atau udara sebagai salah satu hal penting atau di perlukan dalam kerja sistem peralatan. Salah satunya digunakan untuk mengisolasi peralatan tegangan tinggi. 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.

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.

Isolasi gas merupakan salah satu isolasi yang banyak digunakan dalam sistem proteksi peralatan listrik tegangan tinggi. Hal ini dikarenakan kemampuan dielektrik yang dimiliki gas untuk menghadapi tegangan tembus listrik. Kemampuan dielektrik gas tidak jauh lebih baik dari kemampuan dielektrik isolator padat maupun

cair, namun untuk mencapai keefisienan dalam sistem proteksi maka isolator gas dipilih menjadi salah satu sistem proteksi yang digunakan.

Pada umumnya bahan isolasi gas yang paling banyak digunakan adalah gas SF₆, hal ini disebabkan oleh sifat-sifat gas nya yang memenuhi standar dalam sistem proteksi peralatan tegangan tinggi. Selain itu, sifat dielektrik yang bagus pada SF₆ karena luasnya penampang molekul SF₆ dan sifat *electron affinity (electronegativity)* yang besar dari atom fluor. Dengan adanya sifat ini maka SF₆ mampu menangkap elektron bebas (sebagai pembawa muatan), menyerap energinya, dan menurunkan temperatur busur api. Kemampuan dielektrik gas SF₆ 2 sampai 3 kali lebih tinggi dari udara dan kekuatan dielektrik ini bertambah dengan pertambahan tekanan.

Selain gas SF₆ yang digunakan sebagai bahan isolasi, ada beberapa gas lain yang telah diuji untuk melihat kemampuan dielektriknya, diantaranya gas CO₂ dan N₂. Pada penelitian ini gas yang digunakan adalah gas Karbondioksida (CO₂) dan Nitrogen (N₂) yang dicampur ke dalam tabung uji dengan perbandingan tertentu dan menggunakan variasi jenis elektroda yaitu elektroda bola-bola dan elektroda jarum-batang yang diberi tegangan tinggi DC polaritas negatif untuk melihat seberapa besar tegangan tembus dan bagaimana kemampuan dielektrik dari kedua gas. Pada pengujian ini luaran yang diharapkan adalah dapat menjadi referensi alternatif dalam pemilihan gas sebagai bahan isolasi peralatan tegangan tinggi dan memberikan karya ilmiah yang nantinya dapat digunakan sebagai pembanding untuk pengujian selanjutnya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Isolator gas

Isolator adalah salah satu komponen terpenting dalam sistem kelistrikan. Isolator berfungsi melindungi sistem dan peralatan dari kerusakan yang disebabkan gangguan tegangan lebih. Dalam sistem kelistrikan isolator dibagi menjadi isolator padat, isolator cair, isolator gas. Isolator gas bekerja dipengaruhi oleh beberapa faktor yang membuatnya dapat digunakan dalam sistem kelistrikan, diantaranya adalah faktor temperatur, kedielektrikan dan tekanan. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan isolator gas adalah ketidakstabilan

temperatur, ketidaknormalan sifat kedielektrikan pada tekanan yang tinggi dan resiko ledakan dari gas.

Dalam bidang kelistrikan, bahan isolasi gas banyak digunakan sebagai media penyalur panas selain fungsinya sebagai bahan isolasi peralatan listrik. Beberapa bahan isolasi yang umum digunakan dalam sistem proteksi tenaga listrik adalah sebagai berikut :

- a. Udara
- b. *Sulphur Hexafluorida (SF₆)*

Karakteristik dasar gas adalah pembawa muatan (elektron) dalam gas yang terdiri dari elektron-elektron dan ion-ion sangat berpengaruh terhadap proses kegagalan dalam bahan isolasi gas. Karakteristik pembawa muatan pada gas dipengaruhi oleh pergerakan molekul. Pembawa muatan ini dapat bergerak bebas karena pengaruh dari medan listrik. Pembawa muatan pada gas dapat terbentuk melalui proses ionisasi, suhu disekitar elektroda akan naik secara bertahap. Kenaikan suhu ini diakibatkan oleh pergerakan termal sebuah molekul dalam gas yang tidak beraturan. (Wildan Rahadian Putra, I Made Yulistya Negara, IGN Satriyadi).

2.2 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. (L.Bonggas. 2012)

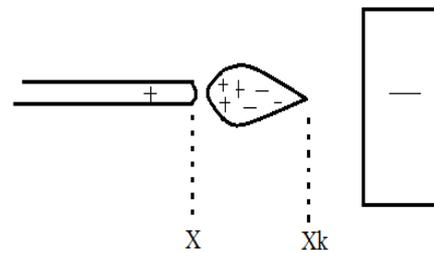
2.3 Pengaruh Polaritas pada Elektroda

Pada elektroda yang lebih kasar, kecil dan runcing dengan polaritas positif akan lebih mudah melepaskan elektron akibat pergerakan elektron yang hanya membutuhkan sedikit energi untuk membantu elektron mengalami proses ionisasi. Akibat kenaikan temperatur disekitar elektroda maka nilai tegangan tembus udara semakin kecil karena temperatur yang tinggi membuat banyak elektron-elektron akan memperoleh energi termal, yang mana energi tersebut akan sangat membantu elektron-elektron mengalami ionisasi. Nilai tegangan tembus pada polaritas tegangan negatif-positif nilainya lebih besar dari pada tegangan tembus pada polaritas positif-negatif. (Teguh, Sasmito Prihatnolo.2011).

Klasifikasi pengaruh polaritas pada elektroda terbagi menjadi dua, yaitu :

1. Elektroda jarum-plat polaritas positif

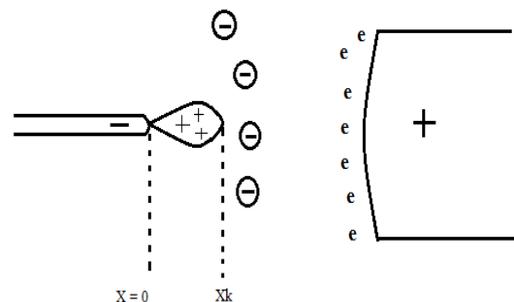
Elektron mula yang berada didepan elektroda jarum-plat yang diberi polaritas negatif membentuk muatan ruang positif pada medan listrik. Jika muatan ruang positif ini cukup besar, maka kuat medan listrik akan menurun dan peluahan akan berhenti. Peluahan akan bertahan dengan sendirinya (*self sustained*) apabila nilai tegangan dinaikkan. Jika keadaan ini berlangsung secara terus menerus, maka akan muncul cahaya (*glow*) disekitar anoda. Pendar yang muncul akan meningkatkan nilai arus cara bertahap namun bersifat fluktuatif. Arus yang meningkat ini akan menimbulkan streamer baru dan akan mengakibatkan terjadinya kegagalan.



Gambar 1. Proses Jarum Positif Plat (Wildan Rahadian Putra, I Made Yulistya Negara, IGN Satriyadi.2015)

2. Elektroda jarum-plat polaritas negatif

Pada elektroda jarum-plat negatif elektron mula akan terbentuk tepat didepan jarum melalui proses emisi elektroda jarum. Pengaruh peluahan terhadap elektroda jarum adalah terkikisnya ujung-ujung dari elektroda jarum sebagai imbas dari adanya peluahan yang terjadi secara konstan. Kuat medan listrik yang terlalu lemah mengakibatkan perkembangan anak luruhan akan terhenti. Terhentinya perkembangan anak luruhan ini diakibatkan juga oleh adanya awan ion negatif. Luruhan baru akan terbentuk melalui proses emisi elektron sekunder yang telah terbentuk akan terdorong ke luar daerah medan yang tinggi dan menjadi ion negatif yang relatif statis. Muatan ruang negatif akan bergerak lambat menuju anoda hingga pada akhirnya peluahan akan terbentuk kembali.



Gambar 2. Proses Jarum Negatif Plat (Wildan Rahadian Putra, I Made Yulistya Negara, IGN Satriyadi.2015)

Jarak sela, bentuk elektroda, bentuk permukaan elektroda yang diberi polaritas tertentu mempengaruhi tegangan tembus yang terjadi. Hal ini dikarenakan adanya perubahan kerapatan udara dan kuat medan listrik yang ada

disekitar elektroda saat proses terjadinya tegangan tembus.(L.Kumara.2011)

2.4 Kegagalan Dielektrik Isolasi Udara

Terjadinya tembus listrik berhubungan dengan peristiwa ionisasi, deionisasi dan emisi.

1. Ionisasi

Ionisasi adalah proses munculnya ion disekitar elektroda yang disebabkan oleh peningkatan tegangan yang diberikan. Udara ideal adalah gas yang hanya terdiri dari molekul-molekul netral, sehingga tidak mengalirkan arus listrik. Tetapi dalam kenyataannya, udara yang sesungguhnya tidak hanya terdiri dari molekul-molekul netral saja tetapi ada sebagian kecil ion-ion dan elektron-elektron bebas, yang dapat mengakibatkan udara dan gas dapat mengalirkan arus walaupun terbatas. Semakin banyaknya elektron bebas yang ada disekitar elektroda maka memperbesar energi kinetik yang dapat menyebabkan proses ionisasi pada molekul atau gas.

Dalam prosesnya, pembangkitan ion terbagi menjadi beberapa proses antara lain:

- a. Ionisasi benturan (*collision*) elektron
- b. Ionisasi termal
- c. Fotoionisasi
- d. Ionisasi radiasi sinar kosmis

2. Deionisasi

Deionisasi adalah peristiwa suatu elektron bebas bergabung dengan suatu ion positif, dimana akan menghasilkan suatu molekul netral. Proses ini terdiri dari kehilangan elektron dengan cara rekombinasi, penggabungan (*attachment*) elektron dan difusi. Deionisasi akan mengurangi partikel bermuatan dalam gas, jika pada suatu gas terjadi aktivitas deionisasi yang lebih besar dari pada aktivitas ionisasi, maka muatan-muatan bebas didalam gas akan berkurang.

Ada empat proses deionisasi yang terjadi dalam proses pemadaman busur api ada suatu pemutus daya, yaitu :

- a. Deionisasi medan elektrik
- b. Deionisasi akibat rekombinasi
- c. Deionisasi akibat pendinginan
- d. Deionisasi tangkapan elektron

3. Emisi

Emisi adalah peristiwa pelepasan elektron dari permukaan suatu loga menjadi elektron bebas didalam gas. Ada dua proses emisi yang berhubungan dengan pembentukan busur api pada pemutus daya, yaitu emisi termal dan emisi medan tinggi, emisi fotoelektrik dan emisi benturan ion positif.

2.5 Mekanisme Tembus Listrik Pada Udara

Ada dua teori mengenai mekanisme tembus listrik pada udara, yaitu, mekanisme townsend dan mekanisme streamer. Mekanisme townsend hanya berlaku pada medan listrik seragam, sedangkan mekanisme streamer berlaku pada medan listrik seragam maupun tidak seragam (Valentino Tarigan.2016).

a. Mekanisme Townsend

Mekanisme townsend ini digunakan di daerah yang sempit dan mempunyai tekanan rendah pada jarak sela antara kedua plat sejajar. Mekanisme townsend ini menjelaskan tentang fenomena kegagalan yang hanya terjadi pada tekanan rendah di bawah tekanan atmosfer.

b. Mekanisme Streamer

Mekanisme streamer menjelaskan terjadinya tembus listrik yang disebabkan oleh muatan ruang dari proses ionisasi radiasi kosmis atau fotoionisasi yg menyebabkan elektron bebas mengalami perubahan arah gaya menuju anoda. Elektron bebas yang muncul menyebabkan muatan ruang karena terjadinya proses ionisasi benturan selama perjalanannya menuju anoda. Mekanisme streamer terbagi 2 jenis :

1. Mekanisme streamer positif
2. Mekanisme streamer negatif

2.6 Gas Karbondioksida (CO₂)

Gas Karbondioksida (CO₂) adalah gas hasil pembakaran dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, hasil pernafasan makhluk hidup. Selain hasil pembakaran bahan bakar fosil dan pernafasan makhluk hidup, gas Karbondioksida (CO₂) juga dihasilkan dari perut bumi yang dikeluarkan dari gunung berapi dan proses geotermal. Gas Karbondioksida (CO₂) adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan mempunyai rasa agak asam.

Sifat lain dari Karbondioksida (CO₂) adalah mempunyai titik lebur -57°C (216 K) dan titik didih -78°C (195 K), tidak mudah bereaksi dengan gas lain, lebih berat dari massa udara, dan tidak mudah terbakar. Dikarenakan sifat tersebut Karbondioksida (CO₂) juga digunakan sebagai bahan pemadam kebakaran.

2.7 Gas Nitrogen (N₂)

Nitrogen (N₂) diperoleh dari udara cair melalui proses yang dikenal sebagai distilasi fraksional. Ciri-ciri gas Nitrogen (N₂) biasanya ditemukan sebagai gas tanpa warna, tanpa bau, tanpa rasa dan merupakan bukan gas diatomik bukan logam yang stabil, sangat sulit bereaksi dengan unsur atau senyawa lainnya, mengembun pada suhu 77° C (196° K) pada tekanan 1 atm dengan titik beku 63° C (-210° K).

Nitrogen (N₂) adalah zat non logam, dengan elektronegatifitas 3.0. Nitrogen merupakan molekul diatomik yang memiliki ikatan rangkap tiga. Energi ikatannya cukup tinggi sehingga sangat stabil dan sulit bereaksi. Karena kesetabilan yang tinggi, Nitrogen dipakai untuk gas pelindung gas oksigen dalam pabrik kimia, industri logam, dan dalam pembuatan komponen elektronika.

3. METODOLOGI PENELITIAN

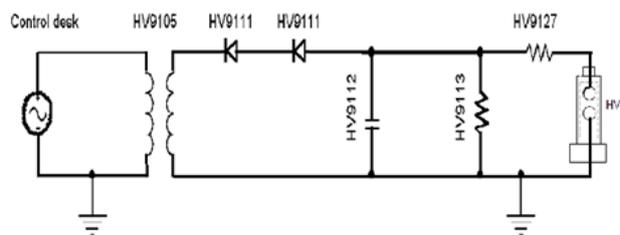
Penelitian dilakukan pada bulan November 2016 sampai bulan Januari 2017 di Laboratorium

3.2 Peralatan Penelitian

Tegangan Tinggi Teknik Elektro Universitas Riau.

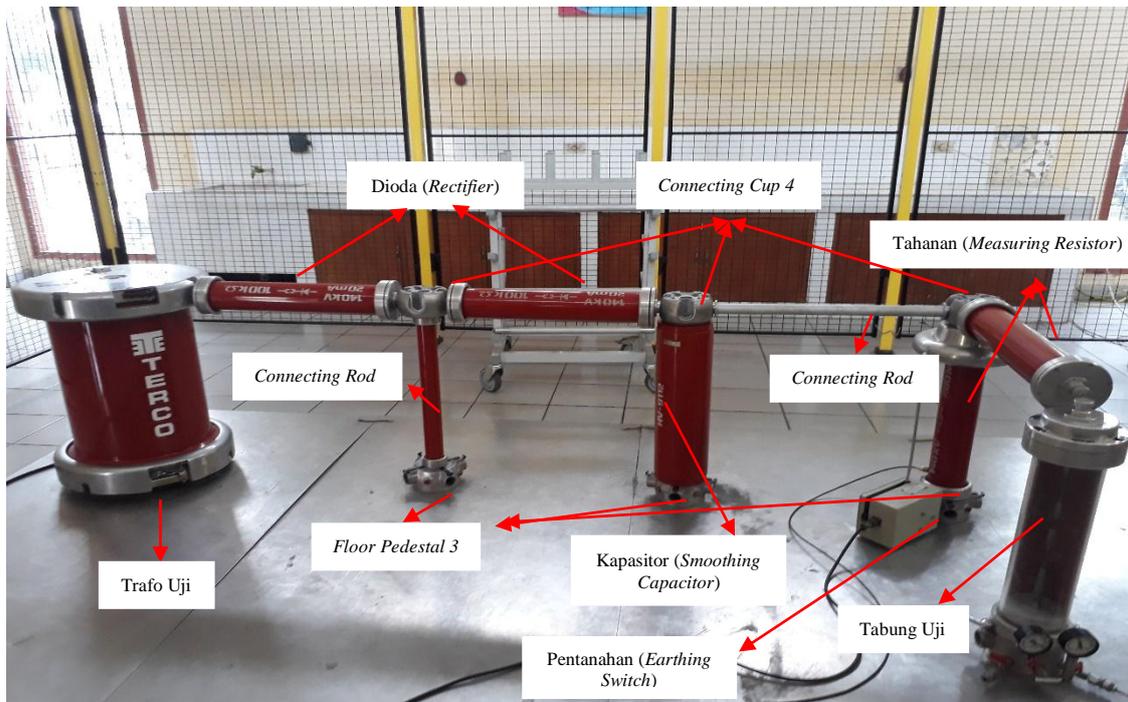
Tahapan dalam penelitian adalah sebagai berikut : menyusun rangkaian pengujian, mengatur sela elektroda dalam tabung pengujian, memasukkan dan mengatur tekanan gas dalam tabung uji, pengujian objek penelitian yang berupa gas CO₂ dan N₂ dengan elektroda bola-bola dan elektroda jarum-batang yang dimasukkan kedalam tabung uji, pengumpulan data yang berupa nilai tegangan tembus.

3.1 Menyusun Rangkaian Pengujian



Gambar 3. Rangkaian DC Polaritas Negatif Secara Teoritis

Penyusunan rangkaian dilakukan berdasarkan buku panduan peralatan pengujian. Rangkaian harus disusun dengan hati-hati dan benar. Kegagalan dalam pengujian dapat terjadi dikarenakan penyusunan rangkaian yang tidak benar dan tidak hati-hati.



Gambar 4 Rangkaian DC Sebagai Rangkaian Pengujian dan Peralatan Pengujian

Alat – alat lain yang digunakan dalam pengujian antara lain :

1. *Control Desk*
2. *Insulating Rod*
3. Elektroda
4. *Osilloscope*
5. *Current Clamp*
6. *Vacum Pump*
7. Tabung gas isi ulang

3.3 Mengatur Sela Elektroda Dalam Tabung Pengujian

Pengaturan sela elektroda dilakukan sebagai variabel yang akan diuji dalam pengujian tegangan tembus bahan isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂). Elektroda yang digunakan adalah elektroda bola-bola dan elektroda jarum-batang. Jarak sela antar elektroda yang diatur mulai dari jarak 0,5 cm, 1 cm, 1,5 cm dan 2 cm. Pengaturan elektroda dilakukan diluar tabung uji, setelah jarak elektroda diatur, elektroda dimasukkan kembali ke dalam tabung uji.

3.4 Memasukkan Dan Mengatur Tekanan Gas Dalam Tabung Uji

Elektroda yang jaraknya sudah di atur kemudian dimasukkan kembali kedalam tabung uji. Tabung uji ditutup rapat agar tidak ada udara yang masuk atau keluar saat gas dimasukkan ke dalam tabung uji.

Sebelum tabung uji dimasukkan gas uji, tabung diuji di vakum menggunakan Vacuum Pump HV9134-A1. Vakum dilakukan dengan tujuan untuk mengeluarkan udara yang ada tertinggal ketika didalam tabung saat memasukkan elektroda. Ketika udara didalam tabung uji sudah benar-benar kosong, gas uji yang berupa gas Karbondioksida (CO₂) dan Nitrogen (N₂) dimasukan secara bertahap sesuai dengan variabel yang akan diuji. Tekanan tabung uji yang diberikan dalam pengujian sebesar 4 bar, gabungan dari kedua tekanan gas uji yang dimasukkan ke dalam tabung uji. Komposisi gas uji di dalam tabung uji disesuaikan agar sesuai dengan tekanan gas yang dibutuhkan yaitu sebesar 4 bar. 100% komposisi gas dalam tabung uji sama halnya dengan 4 bar tekanan dalam tabung.

Tabel 1. Variasi komposisi gas yang dimasukkan kedalam tabung uji

Variasi Perbandingan	CO2	N2
1	25%	75%
2	50%	50%
3	75%	25%

3.5 Pengujian Objek Penelitian Dan Pengumpulan Data

Pengukuran atau pengujian tegangan tembus dapat dilakukan bila semua tahapan telah selesai dilakukan. Pengujian dilakukan sebanyak 20 kali untuk setiap variasi perbandingan gas dan variasi jarak sela yang diberikan. Untuk uji kemampuan tahanan isolasi campuran gas diuji dengan komposisi seimbang dengan jarak 1 cm dan dilakukan pengukuran sebanyak 70 kali. Penelitian juga melakukan pengukuran pada udara bertekanan tanpa campuran dengan tekanan dalam tabung uji sebesar 4 bar menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak sela 0,5 cm dan 1 cm. Hal ini dilakukan sebagai pembandingan kekuatan isolasi pada objek uji.

Data yang dihasilkan dari pengukuran adalah nilai tegangan tembus yang bervariasi. Pengumpulan data dimulai dari pertama kali pengukuran nilai tegangan tembus dilakukan yaitu pada bulan November 2016 sampai bulan Januari 2017 di Laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro Universitas Riau.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Pengujian Tegangan Tembus Isolasi Campuran Gas Karbondioksida (CO₂) Dengan Nitrogen (N₂) Dengan Elektroda Bola-Bola

Pengumpulan data dari pengujian isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) dilakukan menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak antar elektroda yang diberikan sebesar 0,5 cm dan 1 cm, variasi komposisi gas yang dimasukkan kedalam tabung uji dimulai dari perbandingan 25% CO₂ : 75% N₂, 50% CO₂ : 50% N₂ dan 75% CO₂ : 25% N₂, dengan tekanan dalam tabung uji sebesar 4 bar murni campuran gas Karbondioksida (N₂) dengan Nitrogen (N₂). Data hasil pengukuran ditampilkan pada tabel 2 dan tabel 3 :

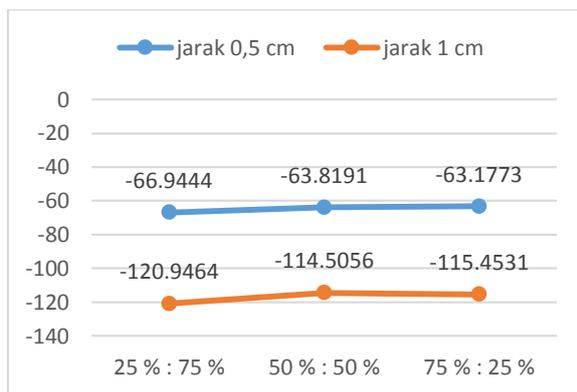
Tabel 2. Data hasil pengukuran tegangan tembus isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak antar elektroda sebesar 0,5 cm.

No	25% CO ₂ : 75% N ₂	50% CO ₂ : 50% N ₂	75% CO ₂ : 25% N ₂
1	-62,48	-58,11	-57,82
2	-60,42	-58,45	-56,79
3	-61,75	-59,59	-57,59
4	-61,38	-59,52	-58,8
5	-62,59	-60,18	-58
6	-62,57	-59,97	-57,56
7	-62,88	-58,51	-56,73
8	-60,74	-58,05	-57,73
9	-61,6	-57,9	-56,47
10	-61,96	-58,88	-58,29
11	-60,19	-57,56	-57,82
12	-59,31	-57,93	-56,53
13	-60,14	-58,62	-57,58
14	-61,56	-57,5	-58,9
15	-60,63	-56,96	-56,61
16	-60,47	-57,55	-58,72
17	-60,97	-59,55	-57,53
18	-59,93	-57,48	-57,86
19	-59,75	-59,22	-56,66
20	-59,81	-58,51	-56,1

Tabel 3. Data hasil pengukuran tegangan tembus isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak antar elektroda sebesar 1 cm

No	25% CO ₂ : 75% N ₂	50% CO ₂ : 50% N ₂	75% CO ₂ : 25% N ₂
1	-114,59	-111,83	-112,35
2	-117,96	-110,28	-103,76
3	-101,67	-110,63	-104,56
4	-112,91	-107,07	-107,01
5	-118,55	-107,92	-108,2
6	-109,94	-108,89	-109,12
7	-114,63	-103,89	-109,92

8	-109,24	-105,67	-108,16
9	-109,66	-106,54	-89,77
10	-110,43	-104,64	-106,57
11	-109,89	-106,42	-105,78
12	-108,89	-104,27	-106,37
13	-114,5	-100,23	-108,77
14	-105,14	-104,49	-108,74
15	-109,54	-99,53	-106,87
16	-108,9	-99,44	-103,18
17	-106,29	-94,61	-106,19
18	-108,16	-103,24	-101,4
19	-108,83	-102,64	-104,01
20	-108,08	-98,44	-103,78

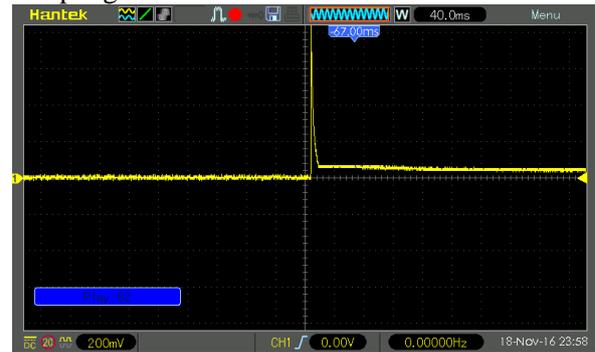


Gambar 5 Grafik perbandingan tegangan tembus pada jarak 0,5 dan jarak 1 cm

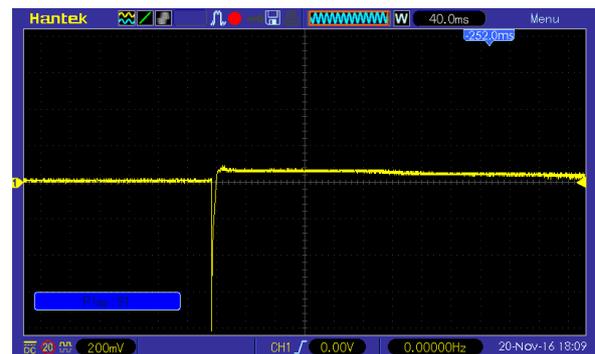
Pada gambar 5 memperlihatkan perbedaan nilai tegangan tembus yang terjadi pada kedua jarak yang diberikan untuk pengujian isolasi campuran gas Karbondioksida (CO_2) dengan Nitrogen (N_2) menggunakan elektroda bola-bola. Pada jarak 0,5 cm dengan perbandingan 25 % CO_2 : 75% N_2 didapat tegangan tembus yang lebih besar dari pada perbandingan 50% CO_2 : 50% N_2 dan perbandingan 75% CO_2 : 25% N_2 dengan besar nilai tegangan tembus yaitu -66,94 kV. Pada jarak 1 cm dengan perbandingan 25% CO_2 : 75% N_2 didapat tegangan tembus yang lebih besar dari pada perbandingan 50% CO_2 : 50% N_2 dan perbandingan 75% CO_2 : 25% N_2 dengan besar nilai tegangan tembus yaitu -120,94 kV.

Ketika tegangan tembus terjadi, timbul arus yang mengalir diantara elektroda. Arus yang mengalir tersebut ditampilkan melalui grafik

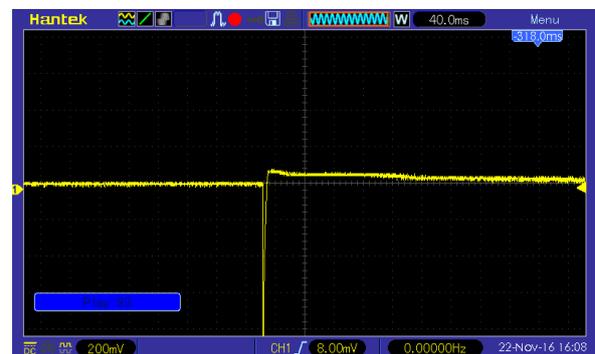
hasil keluaran dari osiloskop digital tipe DS05202B. Seperti yang terlihat pada gambar 6 sampai gambar 11 berikut :



Gambar 6 Grafik arus peluahan pada pengujian isolasi campuran 25 % CO_2 : 75% N_2 menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak 0,5 cm

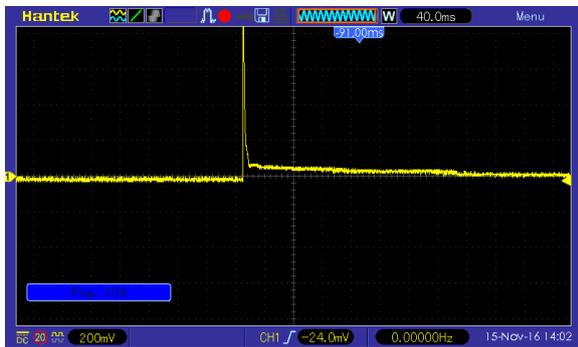


Gambar 7 Grafik arus peluahan pada pengujian isolasi campuran 50 % CO_2 : 50% N_2 menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak 0,5 cm

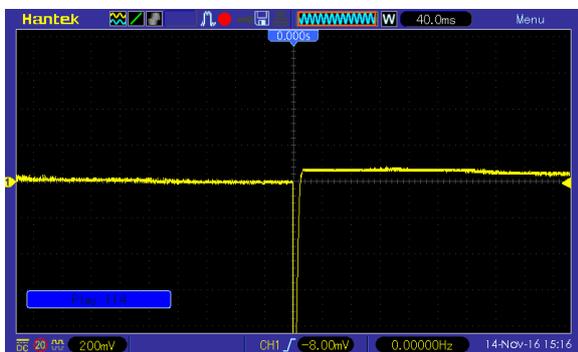


Gambar 8 Grafik arus peluahan pada pengujian isolasi campuran 75 % CO_2 : 25% N_2 menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak 0,5 cm

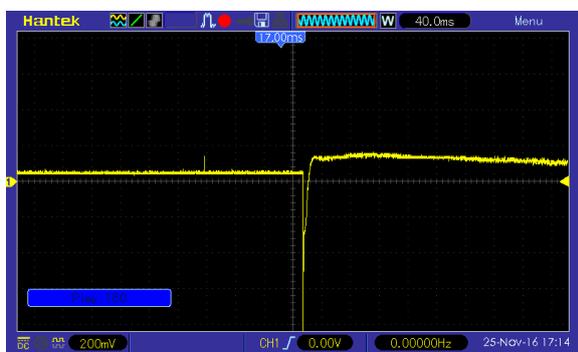
Arus yang mengalir pada elektroda bola-bola dengan jarak 0,5 cm diperlihatkan pada gambar 6 dengan besar arus -109,6 A selama 2 ms, gambar 7 dengan besar arus -81,6 A selama 3,2 ms, dan gambar 8 dengan besar arus -112 A selama 0,3 ms.



Gambar 9 Grafik arus peluahan pada pengujian isolasi campuran 25 % CO₂ : 75% N₂ menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak 1 cm



Gambar 10 Grafik arus peluahan pada pengujian isolasi campuran 50 % CO₂ : 50% N₂ menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak 1 cm



Gambar 11 Grafik arus peluahan pada pengujian isolasi campuran 75 % CO₂ : 25% N₂

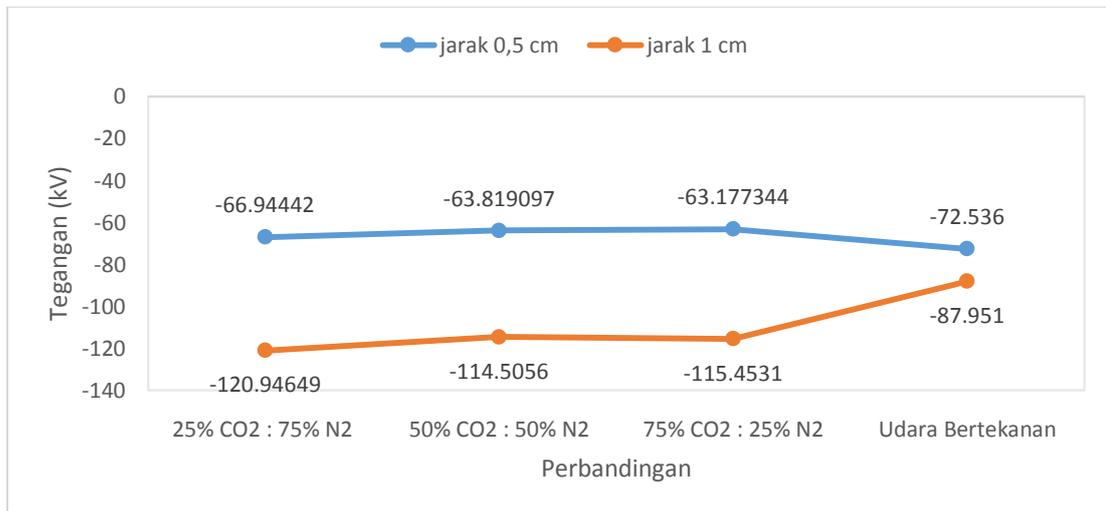
menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak 1 cm

Untuk elektroda bola-bola dengan jarak 1 cm arus yang mengalir diperlihatkan pada gambar 8 dengan besar arus -126,4 A selama 4 ms, gambar 9 dengan besar arus -114,4 A selama 4 ms, dan gambar 10 dengan besar arus -113,6 A selama 5 ms.

Sebagai pembanding objek uji, maka dilakukan pengukuran udara bertekanan tanpa campuran menggunakan elektroda bola-bola yang diberi jarak jarak sela sebesar 0,5 cm dan 1 cm. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4 Data hasil pengukuran tegangan tembus isolasi Udara bertekanan 4 bar pada jarak 0,5 cm dan 1 cm menggunakan elektroda bola-bola

Jarak 0,5 cm		Jarak 1 cm	
Perc	V (kV)	Perc	V (kV)
1	-58,04	1	-61,09
2	-64,47	2	-61,71
3	-72,82	3	-57,02
4	-68,97	4	-70,39
5	-72,2	5	-71,39
6	-72,92	6	-78,72
7	-73,51	7	-81,88
8	-73,5	8	-81,5
9	-53,7	9	-78,39
10	-69,68	10	-84,33
11	-73,45	11	-85,77
12	-72,17	12	-88,24
13	-71,68	13	-93,87
14	-56,5	14	-101,65
15	-70,65	15	-95,72
16	-71,48	16	-99,98
17	-73,28	17	-103,5
18	-73,28	18	-105,13
19	-71,88	19	-80,7
20	-72,94	20	-102,4



Gambar 12 Grafik perbedaan tegangan tembus campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) dan Udara bertekanan pada jarak 0,5 cm dan 1 cm menggunakan elektroda bola-bola dengan tegangan tinggi polaritas negatif.

Pada gambar 12 memperlihatkan grafik perbandingan besar nilai tegangan tembus pada udara bertekanan tanpa campuran dengan bahan isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂). Terlihat pada jarak 0,5 cm udara bertekanan mempunyai nilai tegangan tembus yang lebih besar daripada bahan isolasi campuran gas dengan nilai tegangan tembus sebesar -72,536 kV, sedangkan pada jarak 1 cm bahan isolasi campuran gas mempunyai nilai tegangan tembus yang lebih besar daripada udara bertekanan tanpa campuran dengan nilai tegangan tembus sebesar -120,9464 kV pada perbandingan 25% CO₂ : 75% N₂.

4.2 Pengujian Tegangan Tembus Isolasi Campuran Gas Karbondioksida (CO₂) Dengan Nitrogen (N₂) Dengan Elektroda Jarum-Batang

Pengumpulan data dari pengujian isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) menggunakan elektroda jarum dikombinasikan dengan elektroda batang dengan jarak antar elektroda mulai dari 0,5 cm, 1 cm, 1,5 cm, dan 2 cm, variasi komposisi gas yang dimasukkan kedalam tabung uji dimulai dari perbandingan 25% CO₂ : 75% N₂, 50% CO₂ : 50% N₂ dan 75% CO₂ : 25% N₂, dengan tekanan dalam tabung uji sebesar 4 bar murni campuran gas Karbondioksida (N₂) dengan Nitrogen (N₂).

Data hasil pengujian tegangan tembus bahan isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) di perlihatkan pada tabel 5 sampai tabel 8. Terlihat pada tiap jarak sela elektroda yang diberikan terjadi peningkatan nilai tegangan tembus pada bahan isolasi campuran gas.

NO	25% CO ₂ : 75% N ₂	50% CO ₂ : 50% N ₂	75% CO ₂ : 25% N ₂
1	-34,26	-29,95	-34,35
2	-30,43	-31,52	-33,7
3	-31,48	-33,56	-34,55
4	-33,4	-34,4	-33,82
5	-32,19	-33,03	-34,94
6	-33,11	-32,17	-34,35
7	-31,66	-33,38	-35,06
8	-33,08	-33,61	-38,3
9	-33,8	-35,26	-36,68
10	-32,86	-33,24	-37,96
11	-32,52	-32,43	-36,31
12	-31,23	-33,25	-35,84
13	-31,53	-34,84	-34,54
14	-32,77	-32,55	-36,96
15	-32,95	-33,65	-35,16
16	-31,26	-34,63	-37,23
17	-30,43	-23,11	-35,32

18	-33,65	-31,64	-36,02
19	-32,05	-33,43	-34,81
20	-31,22	-32,65	-36,37

Tabel 5. Data hasil pengujian tegangan tembus bahan Isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) menggunakan elektroda jarum-batang dengan jarak 0,5 cm.

NO	25% CO ₂ : 75% N ₂	50% CO ₂ : 50% N ₂	75% CO ₂ : 25% N ₂
1	-48,18	-53,94	-53,58
2	-52,37	-52,38	-51,88
3	-51,78	-55,1	-51,22
4	-49,69	-53,15	-53,41
5	-49,62	-53,38	-51,88
6	-50,74	-53,44	-52,44
7	-50,18	-54,02	-54,1
8	-50,5	-54,3	-51,66
9	-50,77	-53,77	-53,13
10	-49,37	-52,75	-53,32
11	-48,7	-54,62	-52,67
12	-48,3	-54,17	-53,3
13	-53,63	-55,16	-51,44
14	-52,46	-55,22	-50,45
15	-51,61	-55,29	-52,77
16	-50,49	-54,89	-50,58
17	-50,02	-53,31	-53,08
18	-51,66	-52,9	-52,71
19	-50,71	-52,51	-53,19
20	-50,71	-52,87	-50,52

Tabel 6. Data hasil pengujian tegangan tembus bahan Isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) menggunakan elektroda jarum-batang dengan jarak 1 cm.

NO	25% CO ₂ : 75% N ₂	50% CO ₂ : 50% N ₂	75% CO ₂ : 25% N ₂
1	-58,72	-76,8	-74,57
2	-72,3	-76,91	-73,96
3	-71,37	-74,73	-73,73
4	-70,02	-76,29	-72,76
5	-74,56	-76,88	-73,13

6	-73,89	-76,48	-74,23
7	-74,4	-77,85	-75,66
8	-74,37	-76,37	-74,01
9	-72,31	-75,84	-72,54
10	-73,2	-78,03	-74,73
11	-70,36	-77,75	-72,07
12	-73,2	-77,1	-72,81
13	-71,59	-75,37	-73,6
14	-72,74	-74,91	-74,4
15	-75,07	-75,67	-74,11
16	-73,35	-77,04	-74,45
17	-72,74	-77,44	-74
18	-72,6	-74,92	-73,53
19	-74,79	-73,02	-74,48
20	-72,67	-73,21	-74,74

Tabel 7. Data hasil pengujian tegangan tembus bahan Isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) menggunakan elektroda jarum-batang dengan jarak 1,5 cm.

NO	25% CO ₂ : 75% N ₂	50% CO ₂ : 50% N ₂	75% CO ₂ : 25% N ₂
1	-77,15	-87,96	-89,07
2	-81,94	-88,3	-87,78
3	-80,18	-87,16	-86,94
4	-82,07	-89,02	-90,51
5	-86,62	-92,66	-90,51
6	-87,55	-90,12	-91,06
7	-87,47	-86,91	-89,83
8	-83,01	-87,74	-92,84
9	-88,77	-86,82	-88,84
10	-88,39	-87,79	-90,75
11	-89,55	-89,9	-93,47
12	-89,12	-87,86	-94,07
13	-88,73	-90,04	-88,86
14	-88,7	-88,38	-93,4
15	-88,6	-90,93	-91,43
16	-89,2	-94,32	-91,18
17	-87,97	-86,11	-89,44
18	-89,29	-87,38	-92,6
19	-88,99	-90,44	-93,07

20	-88,36	-85,85	-92,68
----	--------	--------	--------

Tabel 8. Data hasil pengujian tegangan tembus bahan Isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) menggunakan elektroda jarum-batang dengan jarak 2 cm.

4.3 Pengujian Ketahanan Isolasi Bahan Isolasi Campuran Gas Karbondioksida (CO₂) Dengan Nitrogen (N₂)

Pengujian dilakukan pada bahan isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak antar sela sebesar 1 cm. Pengukuran dilakukan secara berulang dengan jarak waktu tiap pengujian selama 3 menit dan pengulangan pengujian sebanyak 70 kali. Tujuan dari pengujian adalah untuk melihat karakteristik dielektrik bahan isolasi campuran gas jika diuji secara berulang.

Komposisi gas dalam tabung uji menggunakan perbandingan gas 50% CO₂ : 50% N₂ dengan tekanan dalam tabung uji sebesar 4 bar. Rata-rata tegangan tembus hasil pengujian dihitung kembali menggunakan rumus kerapatan udara untuk mendapatkan rata-rata tegangan tembus yang terjadi yaitu sebesar -117,016 kV.

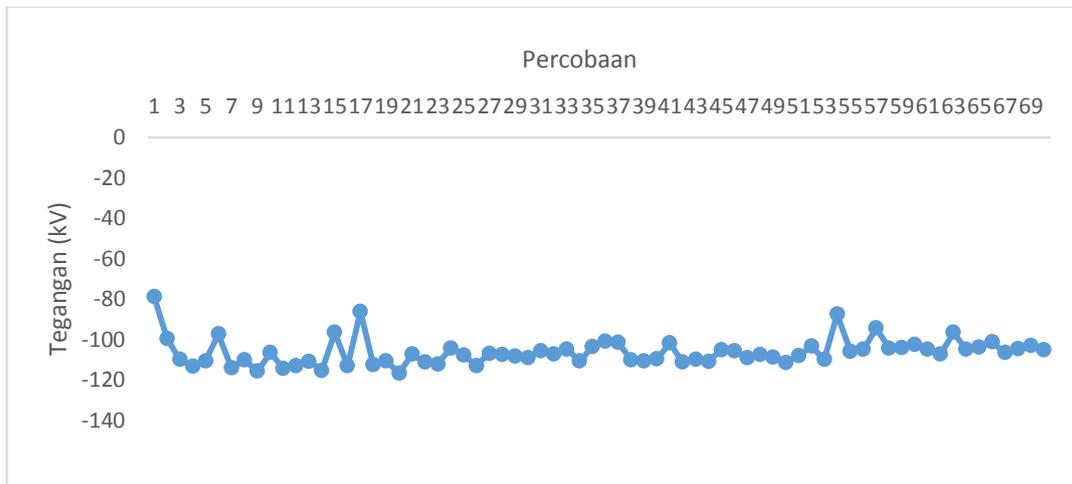
Data hasil pengujian diperlihatkan pada tabel 9. Terlihat pada tabel besar tegangan tembus yang terjadi tidak tetap atau konstan, terjadi proses naik dan turun selama pengujian dilakukan. Hal ini memperlihatkan kemampuan gas dalam memperbaiki molekulnya sendiri selalu berubah ubah. Perubahan nilai tegangan tembus yang terjadi pada pengujian ditampilkan pada gambar 12.

Pada gambar 12 memperlihatkan grafik tegangan tembus bahan isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) dibawah terpaan medan tinggi dc polaritas negatif. Rentang tegangan tembus yang terjadi pada uji ketahanan mulai dari tegangan -78,69 kV hingga tegangan -105,07 kV.

Perc	V (kV)	Perc	V (kV)
1	-78,69	36	-100,89
2	-99,5	37	-101,49
3	-109,91	38	-110,17
4	-113,38	39	-110,57

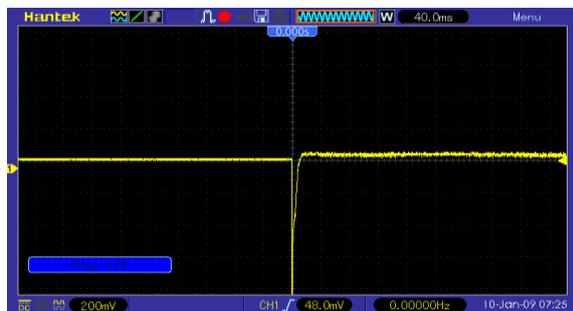
5	-110,65	40	-109,63
6	-97,27	41	-101,77
7	-114,02	42	-111,22
8	-110,19	43	-109,86
9	-115,73	44	-110,88
10	-106,55	45	-105,08
11	-114,29	46	-105,75
12	-113,05	47	-109
13	-110,88	48	-107,44
14	-115,39	49	-108,71
15	-96,47	50	-111,36
16	-113,15	51	-108,08
17	-86,03	52	-103,37
18	-112,58	53	-109,9
19	-110,72	54	-87,51
20	-116,66	55	-105,82
21	-107,27	56	-104,88
22	-111,28	57	-94,32
23	-112,23	58	-104,32
24	-104,32	59	-104,16
25	-107,72	60	-102,51
26	-112,95	61	-104,79
27	-106,9	62	-107,33
28	-107,37	63	-96,52
29	-108,17	64	-104,94
30	-109,1	65	-103,91
31	-105,6	66	-101,19
32	-107,36	67	-106,55
33	-104,82	68	-104,66
34	-110,74	69	-102,92
35	-103,49	70	-105,07

Tabel 9 Data tegangan tembus uji ketahanan Isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) terhadap tegangan tinggi polaritas negatif menggunakan elektroda bola-bola dengan jarak 1 cm.

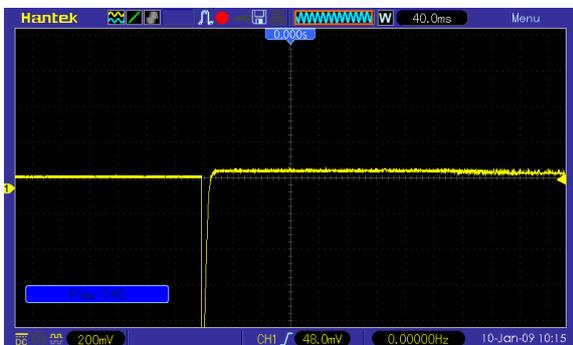


Gambar 13 Grafik tegangan tembus uji ketahanan isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) terhadap tegangan tinggi polaritas negatif

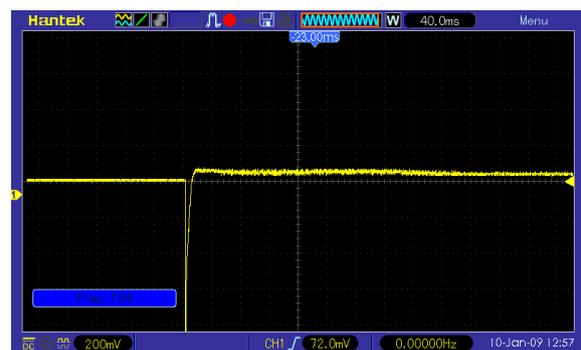
Pengujian yang dilakukan tidak hanya mendapatkan nilai tegangan tembus, tapi juga mendapatkan arus yang mengalir ketika tegangan tembus terjadi. Arus yang mengalir ditampilkan dengan grafik yang merupakan keluaran dari alat osiloskop digital tipe DS05202B.



Gambar 14 Grafik arus peluahan saat uji ketahanan isolasi pada percobaan 8



Gambar 15 Grafik arus peluahan saat uji ketahanan isolasi pada percobaan 38



Gambar 16 Grafik arus peluahan saat uji ketahanan isolasi pada percobaan 70

Pada pengujian 8 arus yang timbul sebesar -109,6 A selama 3 ms, pada percobaan 38 timbul arus sebesar -108,8 A selama 6 ms, dan pada percobaan 70 arus yang timbul -94,4 A selama 0,2 ms.

Perbedaan arus dan tegangan tembus pada pengujian yang telah dilakukan memperlihatkan bahan uji campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) mengalami perubahan kemampuan ketahanan sebagai bahan isolasi ketika proses tembus listrik terjadi secara berulang.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa data dan hasil pembahasan maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Jarak sela antar elektroda yang jauh menimbulkan nilai tegangan tembus yang terjadi menjadi tinggi

2. Semakin luas permukaan elektroda yang digunakan maka akan semakin besar tegangan tembus
3. Untuk pengujian dengan menggunakan elektroda bola-bola pada perbandingan gas 25% CO₂ : 75% N₂ mempunyai tegangan tembus yang lebih besar dari pada pengujian dengan perbandingan 50% CO₂ : 50% N₂, dan perbandingan 75% CO₂ : 25% N₂.
4. Untuk pengujian dengan menggunakan elektroda jarum-batang pada jarak 2 cm dan 0,5 cm di perbandingan 75% CO₂ : 25% N₂ mempunyai tegangan tembus yang lebih besar dari pada perbandingan 25% CO₂ : 75% N₂ dan perbandingan 50% CO₂ : 50% N₂.
5. Untuk pengujian dengan menggunakan elektroda jarum-batang pada jarak 1,5 cm dan 1 cm di perbandingan 50% CO₂ : 50% N₂ mempunyai tegangan tembus yang lebih besar dari perbandingan 25% CO₂ : 75% N₂ dan perbandingan 75% CO₂ : 25% N₂.
6. Dari hasil uji ketahanan isolasi campuran gas Karbondioksida (CO₂) dengan Nitrogen (N₂) dibawah terpaan tegangan tinggi DC polaritas negatif mempunyai rentang nilai tegangan tembus mulai dari -78,69 kV hingga -105,07 kV.

Daftar Pustaka

- F. Sadaoui and A. Beroual. 2013. Surface Discharges over insulators of various materials in presence of SF₆, CO₂, N₂ and SF₆-CO₂ and SF₆-N₂ Mixtures under DC voltage. University of Lyon.
- I Made Yulistya Negara. 2013. *Teknik Tegangan Tinggi Prinsip dan Aplikasi* Praktis. Yogyakarta. Penerbit Graha Ilmu
- Kumara L. 2010. Efek Polaritas dan Fenomena Stres Tegangan Sebelum Kegagalan Isolasi pada Sela Udara Jarum-Plat [skripsi]. Surabaya: Fakultas Teknik, Institut Teknologi Sepuluh November.
- L. Bonggas. 2012. *Dasar Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi Edisi Kedua*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Lim - Dong-Young , Sungwoo Bae. 2015. Study on Oxygen/Nitrogen Gas Mixtures for the Surface Insulation Performance in Gas Insulated Switchgear.. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulatio*. 22:1567-1576.
- Syamsir Abduh. 2001. *Dasar Pembangkit dan Pengukuran Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta. Penerbit Salemba Teknika
- Valentino Tarigan. 2016. Pengaruh banyaknya Tembus dan Variasi Tekanan Gas terhadap Kekuatan Dielektrik Gas Nitrogen [skripsi]. Medan. Departemen Teknik Elektro, Universitas Sumatera Utara
- Wildan Rahadian Putra, I Made Yulistya Negara, IGN Satriyadi. 2015. Pengaruh Bentuk dan Material Elektrode terhadap *Partial Discharge*. Surabaya. Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November (ITS).
- William Steven Sijabat. 2015. Pengaruh Kelembaban Terhadap Tegangan Tembus Udara Pada Elektroda Bola Yang Terpolusi Asam [skripsi]. Medan. Departemen Teknik Elektro, Universitas Sumatera Utara
- Zhijie Jia, Ping Liu, Jianming Li, Lin Yang. 2012. Flashover Characteristics along the Epoxy Resin Insulator under DC Voltage in SF₆ Gas. International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Enviromental Monitoring.