

Sebuah Tinjauan Pustaka: Perbandingan Isolator Gas Untuk High Voltage

Bayu Andhika Ramadhan
Electrical Engineering
Nusa Putra University
Sukabumi, Indonesia
Bayu.andhika_te20@nusaputra.ac.id

Muchtar Ali Setyo Yudono
Electrical Engineering
Nusa Putra University
Sukabumi, Indonesia
muchtar.alisetyo@nusaputra.ac.id

Abstract—Isolator adalah bagian yang penting dalam suatu sistem tenaga listrik. Isolator gas sering digunakan untuk pengisolasian sistem tenaga listrik untuk tegangan tinggi. Sulfur Heksafluorida (SF_6) sudah terkenal di dunia tenaga listrik sebagai isolator gas tegangan tinggi, namun gas tersebut memiliki hal positif dan negatif, gas SF_6 ini bisa merusak lapisan ozon ketika terlepas ke udara. Oleh karena itu dicarilah alternatif untuk pengganti gas dari SF_6 ini untuk menjadi isolator menahan loncatan listrik atau busur api pada tegangan listrik. Maka para peneliti mencarilah solusi alternatif dari mulai gas karbondioksida CO_2 , Nitrogen (N_2), CF_3CN sampai CF_3I . Dari berbagai gas tersebut CF_3I dengan dicampurkan N_2 menjadi potensi untuk menjadikan solusi alternatif pengganti gas dari SF_6 dalam media isolasi listrik dengan perbandingan 30%/70%.

Keywords—Isolator gas, loncatan listrik atau busur api, SF_6 , CF_3I , Efek rumah kaca

I. PENDAHULUAN

[1] Isolasi adalah bagian penting dalam sistem tenaga listrik. Isolasi berfungsi untuk menahan penghantar yang bertegangan supaya tidak terjadi loncatan Listrik atau busur api. Isolasi di bagi menjadi 3 jenis yaitu ada isolasi dari gas, cair dan padat, dari ketiga jenis isolasi ini digunakan sesuai dengan kebutuhan pengisolasian masing-masing [2]. Dalam pengisolasian gas yang begitu sering digunakan untuk sebagai bahan isolasi adalah gas Sulfur heksafluorida (SF_6), udara dan isolasi vakum merupakan jenis dari isolasi gas yang sudah terkenal dan luas penggunaannya dalam hal pengisolasian peralatan sampai saat ini [30]. Namun penggunaan ketiga isolasi tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Tegangan tembus isolasi dipengaruhi beberapa faktor seperti bentuk, jarak, suhu dan permukaan dari elektroda yang digunakan [3].

Loncatan listrik atau busur api itu dikarenakan adanya pelepasan muatan antara penghantar yaitu suatu bentuk kegagalan yang terjadi di isolasi dimana tegangan listrik yang diberikan melebihi batas dari kekuatan isolasi. Salah satu teknik untuk mencegah terjadinya loncatan Listrik atau busur api antara elektroda perlu di tiupkannya gas dingin yang kemampuannya bisa menjadi isolator sehingga tidak terjadinya loncatan Listrik atau busur api [4]. Gas sulfur heksafluorida (SF_6) sering digunakan dalam komponen high voltage sebagai circuit breaker dalam Gardu Induk tegangan ekstra tinggi 500kV, Gardu Induk 150kV, Gardu Induk 70kV dan Gardu Induk 20kV.

Pada COP3 yang di agendakan di Kyoto pada tahun 1997 bahwa gas SF_6 ditetapkan sebagai gas yang di atur,

dikarenakan bisa merusak lapisan ozon yang [5]. Dikarenakan gas SF_6 ini berbahaya Ketika terlepas ke udara maka pada peneliti mencari Solusi alternatif untuk menggantikan gas SF_6 untuk melindungi bumi ini, maka ditemukanlah solusi alternatif untuk pengganti gas ini seperti CF_4 , C_3F_8 , CO_2 , N_2 , CF_3I , dan O_2 [5].

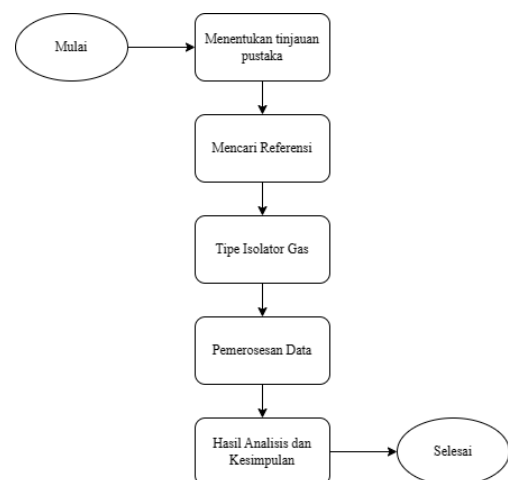
Temuan yang ditemukan dalam isolator gas untuk menahan loncatan listrik atau busur api dengan menggunakan isolator gas, dengan hasil 0.75-1,2 kali lebih baik dari gas SF_6 Menurut jumlah peneliti sebelumnya [6]. Oleh karena itu dengan menggunakan publikasi yang relevan dari tahun 2013 sampai dengan 2023, jurnal ini akan mengkaji tinjauan Pustaka yang berkaitan dengan isolator gas.

II. METODE

Pendekatan dalam penelitian ini menggunakan study litelature atau study keperustakaan, study litelature ini dapat di tempuh dengan melakukan mengumpulkan refensi yang terkait dalam penelitian tersebut kemudian di kombinasikan untuk menjadikan suatu kesimpulan [7]. Dibawah ini adalah pertanyaan pertanyaan dalam penelitian ini.

- Jenis gas apa yang di gunakan sebagai isolator untuk menahan loncatan listrik atau busur api ?
- Bagaimana sifat dari gas tersebut ?
- Menggunakan tekanan berapa gas tersebut sehingga bisa memadamkan bususr api atau loncatan listrik ?

Adapun langkah-langkah dalam penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 1. Planning penelitian

Menurut gambar 1 pada Langkah pertama menentukan tujuan Pustaka. Dimana kita menentukan tujuan tadi Pustaka seperti isolator gas, tipe gas yang digunakan dan tekanan gas yang digunakan. Setelah itu kita melakukan pencarian refensi yang terkait dalam tujuan Pustaka setelah itu menyeleksi tipe tipe isolator gas yang menjadikan alternatif pengganti dari gas SF₆. Langkah selanjutnya kita melakukan penyeleksian data yang ada dalam berbagai refensi yang ada, lalu menukan analisis dari hasil penelitian tersebut sehingga mendapatkan kesimpulan dari penelitian ini.

III. HASIL PENELITIAN

A. Isolator Gas

Dari beberapa isolator gas pada di penelitian masa lalu untuk menggantikan gas SF₆ sebagai isolator gas untuk pemutus tegangan tinggi. Ini adalah berbagai sifat sifat gas yang mampu untuk menahan busur api atau loncatan listrik :

1. Karbondioksida CO₂

Gas karbondioksida CO₂ adalah gas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, hasil pernafasan mahluk hidup [8]. Bukan hanya dari hasil pembakaran fosil dan pernafasan dari mahluk hidup, gas karbondioksida CO₂ juga bisa dihasilkan dari perut bumi yang keluar melalui gunung berapi dan proses geothermal [9]. Gas CO₂ adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan mempunyai bau asam [10].

Sifat lain dari CO₂ juga mempunyai titik lebur -57°C (216 K) dan titik didih mencapai -78°C (195k), tidak mudah bereaksi dengan gas lain, lebih berat dari massa udara, dan tidak mudah terbakar, CO₂ juga dapat menjadi pemadam untuk kebakaran [11].

2. Nitrogen N₂

Nitrogen N₂ dari udara cair yang di proses melalui distilasi fraksional [12]. Ciri dari N₂ biasanya ditemukan sebagai gas tanpa warna, tidak memiliki bau, tanpa rasa dan merupakan buka gas diatomic bukan logam yang stabil, tidak sulit breaksi dengan unsur senyawa lainnya, mengembun pada suhu 77°C (196°K) pada tekanan 1 atm dengan titik beku 63°C (- 210°K) [13].

Nitrogen N₂ juga zat non logam, dengan elektronegatifitas 3.0. N₂ merupakan molekul diatomic yang memiliki ikatan rangkap tiga [14]. Energi ikatan sangat tinggi sehingga sangat stabil dan sulit breaksi, ketabilan inilah yang dipakai untuk pelindung gas oksigen dalam pablik kimia, industry logam dan dalam pembuatan komponen elektronika.[15]

3. Sulfut Hexafluirida SF₆

Gas Sulfut Hexafluorida adalah unsur campuran gas yang tidak beracun, tidak memiliki bau, tidak berwarna dan tidak mudah terbakar. Hingga pada temperatur 500°C gas ini memiliki susunan molekul yang sangat stabil mendekati sifat gas mulia, tidak akan terurai dan tidak terjadi reaksi kimia dan bahan lain. [16]

Sifat kimiawi dari gas SF₆ ini sangat stabil, pada temperature sekitar bisa berupa gas netral dan juga sifat pemanasannya yang sangat stabil. Pada temperature diatas 150°C memiliki sifat tidak merusak metal plastic dan bermacam-macam bahan yang umumnya dipakai dalam pemutus tegangan tinggi atau high voltage [17].

4. Trifluoridomethana CF₃I adalah helometana, ini sering di pakai sebagai gas untuk memadamkan kebakaran pesawat terbang dan peralatan elektronik [10].

Sifat dari gas ini tidak memiliki warna, tidak berbau, dan titik lebur pada -110°C (163K) dan memiliki titik didih pada -22,5°C (250,7K). trifluoridomethana mengandung karbon, fluor, dan gunung berapi yang terbantuk dari hydrogen klorida dibandingkan klorin,[18]

Dalam penelitian sebelumnya untuk mencari Solusi alternatif pengganti dari sebuah gas SF₆ dengan membandingkan pengaruh untuk menahan terjadinya loncatan listrik atau busur api dalam tegangan tinggi, jenis gas yang digunakan dalam memadamkan busur api, perbandingan gas yang digunakan dalam untuk menggantikan gas SF₆ [19]. Dalam penelitian sebelumnya menghasilkan temuan temuan sebagai berikut :

Ref	Jurnal Title	Jenis Gas	Perbandingan Gas dan Tekanan	Hasil
20	Sifat Dielektrik Campuran Gas CO ₂ Dengan Nitrogen (N ₂) Dibawah Terpaan Medan Tinggi DC Polaritas Positif [20]	Karbondi oksida (CO ₂) dan Nitrogen (N ₂)	50% CO ₂ dan 50% N ₂	menggunakan elektroda bola-bola diameter 5 cm, tegangan tembus yang relatif mengalami kenaikan sebesar 77,07 kV sampai 110,68 kV dengan diameter elektroda 5 cm.
21	Karakteristik Tegangan Tembus Gas CO ₂ Dengan Menggunakan Pembangkit Tegangan	Karbondi oksida (CO ₂)	-	Dengan menggunakan waibull 50% tegangan tembus pada CO ₂ 26kV dengan aliran Listrik DC positif.

	Tinggi DC Polaritas Positif [21]			
22	Karakteristik Dielektrik Campuran Gas Karbondioksida (CO ₂) Dengan Nitrogen (N ₂) Dibawah Terpaan Medan Tinggi DC Polaritas Negatif [22]	Karbondioksida (CO ₂) dan Nitrogen (N ₂)	50% CO ₂ dan 50% N ₂	Tegangan kerusakan berkisar dari -78,69 kV hingga -105,07 kV selama pengujian dengan jarak batang 2 cm
6	Experimental Investigation of the Breakdown Voltage of CO ₂ , N ₂ , and SF ₆ Gases, and CO ₂ -SF ₆ and N ₂ -SF ₆ Mixtures under Different Voltage Waveforms [6]	Karbondioksida (CO ₂), Nitrogen (N ₂) dan heksafluorida (SF ₆)	-	CO ₂ dan N ₂ , serta campurannya dengan SF ₆ , menunjukkan potensi sebagai gas untuk aplikasi tegangan tinggi (HV). Namun dengan gas SF ₆ ini biayanya begitu mahal dan efek untuk dampak lingkungan yang tidak baik.
23	Gas decomposition and electrode degradation characteristics of a 20% C ₃ F ₇ CN and 80% CO ₂ gas mixture for high voltage accelerators [23]	Karbondioksida (CO ₂), CF ₇ CN	20% CO ₂ 80% CF ₇ CN	Campuran gas 20% C ₃ F ₇ CN/ 80% CO ₂ menunjukkan penurunan yang signifikan dalam kinerja kerusakan dalam 200 kerusakan pertama, menunjukkan bahwa itu tidak stabil seperti

				SF ₆ . ampel gas yang dikumpulkan setelah kerusakan 1000 DC dari campuran 20% C ₃ F ₇ CN/ 80% CO ₂ ditemukan tidak beracun, dengan perkiraan nilai toksisitas 54.459 ppmv
24	Factors Dominating Dielectric Performance of Real-size Gas Insulated System and Their Measures by Dielectric Coatings in SF ₆ and Potential Gases [24]	heksafluorida (SF ₆)	-	SF ₆ pada 0,4 MPa menurun seiring bertambahnya luas elektroda efektif, sedangkan nilai lanjutan elektroda berlapis dielektrik lebih dari 90% bahkan di area yang sangat luas lebih dari 105 mm ²
25	Fundamental Insulation Characteristics of Air, N ₂ , CO ₂ , N ₂ /O ₂ , and SF ₆ /N ₂ Mixed Gases [25]	Udara (O ₂), Karbondioksida (CO ₂), Nitrogen (N ₂) dan sulfur heksafluorida (SF ₆)	0,2 hingga 0,6 MPa	udara dan N ₂ memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas alternatif lainnya Dan gas SF ₆ ini juga 23.500 kali lipat dari CO ₂
26	Investigation of the Performance of CF ₃ I Gas	Trifluoromethyl (CF ₃ I), Karbondioksida (CO ₂)	30% CF ₃ I 70% CO ₂	Campuran CF ₃ I-CO ₂ (30%-70%) memiliki kekuatan dielektrik sekitar 0.75

	as Possible Substitute for SF ₆ [26]	atau Nitrogen (N ₂)		hingga 0.80 kali lipat dari SF ₆ .
27	Field-Time Breakdown Characteristics of Air, N ₂ , CO ₂ , and SF ₆ [27]	Udara (O ₂), Karboni oksida (CO ₂), Nitrogen (N ₂) dan sulfur heksaflu orida (SF ₆)	-	udara, tegangan yang mampu ditahan berkisar antara 5 hingga 30 kV, untuk nitrogen (N ₂) berkisar antara 4 hingga 20 kV, dan untuk sulfur heksafluorid a (SF ₆) berkisar antara 4 hingga 25 kV
28	Arc voltage as an indicator of nozzle ablation degradation in high voltage co2 gas circuit breakers[2 8]	Karboni aoksida (CO ₂)	-	Pada penelitian ini dilakukan uji coba pada tegangan 5,20,30 kA. Gas CO ₂ di dorong oleh nosel untuk memadamka n loncatan api, Tegangan pada puncak arus menurun dengan jumlah operasi di bawah 20 kA dan kondisi gangguan arus puncak 35 kA. Penurunan tegangan pada puncak arus dipengaruhi oleh ukuran penampang busur dan kandungan PTFE memasuki zona

				busur, yang mempengaru hi konduktivita snya.
29	Potential of CF ₃ I Gas Mixture as an Insulation Medium in Gas- Insulated Equipment [29]	Trifluoro methyl (CF ₃ I), Nitrogen (N ₂)	30% CF ₃ I 70% N ₂	Dengan mencapurka n 30% dari CF ₃ I dan 70% N ₂ adalah 6,27kV/mm/ bar. Bahwa CF ₃ I dapat menggantika n gas SF ₆ karena nilai dielektrik dari gas tersebut 1,2 kali lebih tinggi dari SF ₆ . CF ₃ I juga memiliki nilai kerusakan ozon sebesar 0,008.

Pada bagian ini dari studi yang diusulkan, hasil dari tinjauan literatur yang sistematis di bahas. Alternatif dari isolator gas yang biasanya sering digunakan dalam tegangan tinggi biasanya yaitu gas SF₆. Gas SF₆ juga memiliki efek gas rumah kaca yang buruk untuk bumi, hampir 23.500 kali lipat dari gas karbondioksida CO₂.

Mayoritas penelitian ini pada lebih condong terhadap gas CF₃I untuk menjadi alternatif isolator gas pengganti dari SF₆ untuk listrik tegangan tinggi. Dengan CF₃I dengan kandungan murni memiliki kekuatan dielektrik 1,2 kali lebih tinggi dari pada SF₆. Kecuraman kemiringan untuk SF₆ dan CF₃I menunjukkan bahwa kedua relatif rapuh, karena pertumbuhan ionisasi yang kuat. Dengan campuran 30%/ CF₃I dan 70% N₂ ditemukanlah 6,27 kV/mm/bar.

VI. KESIMPULAN DAN PEKERJAAN DI MASA DEPAN

Karya ini menawarkan sebuah tinjauan Pustaka tentang perbandingan isolator gas untuk high voltage. Banyak topik penelitian dari penelitian yang diperiksa, hasil dari penelitian ini adalah bahwa gas Trifluoromethyl (CF₃I) dengan menggunakan campuran dari Nitrogen (N₂) dengan perbandingan 30%/70% memiliki kekuatan nilai dielektrik sampai dengan 6,27kV/mm/bar. Dan gas CF₃I ini juga bisa untuk menekan bagaimana pemanasan global yang dikarenakan efek rumah kaca.

Studi masa depan dalam penelitian ini adalah pada tekanan gas yang di perlukan untuk menahan nilai

dielektrik dan dengan estimasi harga perbandingan antara penggunaan gas SF₆ dan gas CF₃I.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Goeritno and B. Irawan Syaputra, "Kelayakan Operasi Pemutus Tenaga (Pmt) Tegangan Ekstra Tinggi Bermedia Gas Sulphur Hexafluoride (Sf₆) Berdasarkan Kualitas Gas, Keserempakan Titik Titik Kontak, Dan Parameter Resistans," *Electron. Journals UIKA Bogor (Universitas Ibn Khaldun)*, vol. no., p. 7, 2000.
- [2] C. Tateyama, T. Kobayashi, A. Kumada, and K. Hidaka, "Conceptual Design and Feasibility Study of Flexible Gas-Insulated Transmission Line Using CF₃I Gas Mixture," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 4, pp. 1424–1430, 2021, doi: 10.1109/TDEI.2021.009605.
- [3] P. Widger and A. Haddad, "Analysis of gaseous by-products of CF₃I and CF₃I-CO₂ after high voltage arcing using a GCMS," *Molecules*, vol. 24, no. 8, 2019, doi: 10.3390/molecules24081599.
- [4] H. E. Nechmi, A. Beroual, A. Girodet, and P. Vinson, "Fluoronitriles / CO₂ gas mixture as an eco-friendly alternative candidate to F₆ in high voltage insulation systems," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, vol. 2016-December, no. 5, pp. 384–387, 2016, doi: 10.1109/CEIDP.2016.7785493.
- [5] E. C. De Lyon, U. Lyon, and N. Sf, "Investigasi eksperimental tegangan tembus gas N₂-SF₆ di bawah bentuk gelombang tegangan yang berbeda," pp. 16–21, 2016.
- [6] A. Beroual, U. Khaled, and M. L. Coulibaly, "Experimental investigation of the breakdown voltage of CO₂, N₂, and SF₆ gases, and CO₂-SF₆ and N₂-SF₆ mixtures under different voltage waveforms," *Energies*, vol. 11, no. 4, pp. 1–12, 2018, doi: 10.3390/en11040902.
- [7] S. Kawaguchi, K. Satoh, and H. Itoh, "Electron transport in CF₃I and CF₃I-N₂ mixtures," *Eur. Phys. J. D*, vol. 68, no. 4, 2014, doi: 10.1140/epjd/e2014-40682-9.
- [8] Y. Z. Ju and X. L. Wu, "Analysis of vibration isolator's anti-seismic performance in porcelain SF₆ high voltage circuit breaker," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 448–453, pp. 2045–2048, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.2045.
- [9] L. Chen, P. Widger, M. S. Kamarudin, H. Griffiths, and A. Haddad, "CF₃I Gas Mixtures: Breakdown Characteristics and Potential for Electrical Insulation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 2, pp. 1089–1097, 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2602259.
- [10] S. Zhao, D. Xiao, H. Zhang, and Y. Deng, "Discharge characteristics of CF₃I/N₂ mixtures under lightning impulse and alternating voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 5, pp. 2731–2737, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006521.
- [11] S. S. Tezcan, M. S. Dincer, and S. Bektas, "Effective ionization coefficients, limiting electric fields, and electron energy distributions in CF₃I + CF₄ + Ar ternary gas mixtures," *Phys. Plasmas*, vol. 23, no. 7, pp. 4–9, 2016, doi: 10.1063/1.4958642.
- [12] E. André-Maouhoub, P. André, S. Makhlof, and S. Nichele, "Production of Graphite During the Extinguishing Arc with New SF₆ Alternative Gases," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 40, no. 4, pp. 795–808, 2020, doi: 10.1007/s11090-020-10078-y.
- [13] N. M. B. Sham, N. Z. Zahid, M. S. Kamarudin, N. A. M. Jamail, and R. Abd-Rahman, "Breakdown Characteristic of N₂-CO₂ Gas Mixtures under AC and DC Test Voltages," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1874, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1874/1/012027.
- [14] Y. Shiba, Y. Morishita, S. Kaneko, S. Okabe, H. Mizoguchi, and S. Yanabu, "Study of DC circuit breaker of H₂-N₂ gas mixture for high voltage," *Electr. Eng. Japan (English Transl. Denki Gakkai Ronbunshi)*, vol. 174, no. 2, pp. 9–17, 2011, doi: 10.1002/eej.21042.
- [15] A. Beroual and A. Haddad, "Recent advances in the quest for a new insulation gas with a low impact on the environment to replace Sulfur Hexafluoride (SF₆) gas in high-voltage power network applications," *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017, doi: 10.3390/en10081216.
- [16] Z. Shiling and W. Jianchao, "Research Platform and Long-term Performance Assessment of High Voltage SF₆ Gas Insulated Bushing," *7th IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE 2020 - Proc.*, pp. 0–3, 2020, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279583.
- [17] D. Xiao, "The Performance of Insulation and Arc Interruption of the Environmentally Friendly Gas CF₃I," *New Trends High Volt. Eng.*, 2018, doi: 10.5772/intechopen.79968.
- [18] S. Wetzeler, P. G. Nikolic, D. Eichhoff, and A. Schnettler, "Non-invasive diagnosis of SF₆ high voltage Selfblast circuit breaker nozzles," *Proc. 2014 IEEE Int. Power Modul. High Volt. Conf. IPMHVC 2014*, pp. 568–571, 2014, doi: 10.1109/IPMHVC.2014.7287339.
- [19] Y. Cressault, V. Connord, H. Hingana, P. Teulet, and A. Gleizes, "Transport properties of CF₃I thermal plasmas mixed with CO₂, air or N₂ as an alternative to SF₆ plasmas in high-voltage circuit breakers," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 44, no. 49, 2011, doi: 10.1088/0022-3727/44/49/495202.
- [20] M. Anderson and F. Murdiya, "Sifat Dielektrik Campuran Gas CO₂ Dengan Nitrogen (N₂) Dibawah Terpaan Medan Tinggi DC Polaritas Positif," *Jom FTEKNIK*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, 2017.
- [21] N. W. Septiani, "No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title," vol. 4, no. 1, pp. 1–14, 2017.
- [22] Y. Prasetyo and F. Murdiya, "Karakteristik Dielektrik Campuran Gas Karbondioksida (CO₂) Dengan Nitrogen (N₂) Dibawah Terpaan Medan Tinggi DC Polaritas Negatif," *Jom FTEKNIK*, vol. 5, no. 1, pp. 1–14, 2018.
- [23] I. Idrissu, Q. Han, L. Chen, L. Maksoud, and Y. Kieffel, "Gas decomposition and electrode degradation characteristics of a 20% C₃F₇CN and 80% CO₂ gas mixture for high voltage accelerators," *High Volt.*, vol. 6, no. 5, pp. 750–759, 2021, doi: 10.1049/hve2.12120.
- [24] H. Hama and S. Okabe, "Factors dominating dielectric performance of real-size gas insulated system and their measures by dielectric coatings in SF₆ and potential gases," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 5, pp. 1737–1748, 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6633704.
- [25] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, F. Endo, and T. Oomori, "Fundamental insulation characteristics of air, N₂, CO₂, N₂/O₂, and SF₆/N₂ mixed gases," *Electr. Eng. Japan (English Transl. Denki Gakkai Ronbunshi)*, vol. 155, no. 3, pp. 9–17, 2006, doi: 10.1002/eej.20348.
- [26] H. Katagiri, H. Kasuya, H. Mizoguchi, and S. Yanabu, "Investigation of the performance of CF₃I gas as a possible substitute for SF₆," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 5, pp. 1424–1429, 2008, doi: 10.1109/TDEI.2008.4656252.
- [27] T. Liu et al., "Field-Time Breakdown Characteristics," pp. 1–11, 2020.
- [28] Y. Zhou, J. Humphries, J. Spencer, and J. Yan, "Arc Voltage As an Indicator of Nozzle Ablation Degradation in High-Voltage Co₂ Gas Circuit Breakers," *Plasma Phys. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 85–88, 2023, doi: 10.14311/ppt.2023.2.85.
- [29] B. Fan, Y. Qian, Y. Zang, Z. Li, and X. Zhou, "Numerical modelling of positive surface discharges in c-c4 f8/cf3 i/n2 gas mixture under non-uniform field," *Energies*, vol. 14, no. 24, 2021, doi: 10.3390/en14248299.
- [30] W. Dorau, I. M. Al-Vvakeel, and H. Knapp, "VLE data for CO₂-CF₃C 12, N₂-CO₂, N₂-CF₃C 1, and N₂-CO₂-CF₃C 1," no. January, pp. 29–35, 1983.