

Pengaruh Bahan Dielektrik Padat Terhadap Perubahan Medan Listrik Sistem Tegangan Tinggi (HVDC)

Sanupal Muzamil*, Wisnu Kartika

Program Studi Teknologi Elektro-medis, Program Vokasi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Indonesia
Gedung E8 Djarnawi Hadikusuma, Kampus Terpadu UMY, Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, D.I.Yogyakarta 55183
E-mail: sanupal.muzamil@umy.ac.id, wisnu2027@umy.ac.id

INFO ARTIKEL

Alamat Web Artikel:

<https://journal.umy.ac.id/index.php/mt/article/view/26334>

DOI:

<https://doi.org/10.18196/mt.v6i2.26334>

Data Artikel:

Diterima:

22 Januari 2025

Direview:

07 Februari 2025

Direvisi :

07 Maret 2025

Disetujui :

13 April 2025

Korespondensi:

sanupal.muzamil@umy.ac.id

ABSTRAK

Gas sulfur hexafluoride (SF₆) banyak diterapkan pada komponen sistem tenaga listrik bertegangan tinggi karena keunggulannya dalam redaman percikan api, transfer panas dan tahanan dielektrik yang kuat. Di lain sisi gas tersebut menimbulkan potensi pemanasan global yang sangat besar. Oleh karena itu gas alternatif ramah lingkungan dan langkah fundamental diperlukan untuk memahami secara mendalam desain gas alternatif. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendesain pemodelan insulasi hybrid (padat dan gas) ramah lingkungan dengan menggunakan model numerik finite element method (FEM) dari software Comsol® Multiphysics. Hasil pemodelan ini bisa dimanfaatkan untuk mengetahui karakteristik bahan insulasi alternatif tegangan tinggi. Dengan menggunakan persamaan elektrostatik, nilai tegangan dan relative permittivity divariasikan untuk mengetahui perubahan medan listrik dan garis-garis medan listrik (fluks). Pemodelan ini memperlihatkan bahwa semakin besar nilai relative permittivity, maka nilai medan listrik pada 3 batas penghujung jarum (gas/padat/logam) akan meningkat. Selain itu jika nilai permitivitas relatif meningkat, garis medan listrik (fluks) akan terkonsentrasi di sekitar tepi bahan dielektrik padat.

Kata Kunci: SF₆, Environmentally Friendly, Medan Listrik, Hybrid System.

ABSTRACT

Sulfur hexafluoride (SF₆) gas is widely applied in high-voltage power system components because of its advantages in arc quenching, heat transfer and strong dielectric. On the other hand, this gas has a very large global warming potential. Therefore, environmentally friendly alternative gases and fundamental steps are needed to deeply understand the design of these alternative gases. The purpose of this study is to model the environmentally friendly hybrid insulation design (solid and gas) using a numerical model of the finite element method (FEM) from Comsol® Multiphysics software. The results of this model can be applied for deeply understanding characteristics of friendly environmentally high-voltage gas insulations. Using electrostatic equations, the voltage and relative permittivity values are varied to determine changes in the electric field and electric field lines (flux). This modeling shows that the greater the relative permittivity value, the electric field value at the 3 needle end boundaries (gas/solid/metal) will increase. In addition, if the relative permittivity value increases, the electric field streamlines (flux) will concentrate around the edge of the solid dielectric material.

Keywords: SF₆, Environmentally Friendly Gas, Electric Field, Hybrid System.

1. PENDAHULUAN

Penelitian tentang isolasi hybrid gas dengan dielektrik padat difokuskan untuk mengetahui karakteristik tegangan tembus pada replikasi komponen sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan model komputasi dengan menerapkan software (Comsol® Multiphysics) untuk mengetahui karakteristik sebaran medan listrik pada isolasi hybrid gas dengan dan dielektrik padat. Ada beberapa cara berurutan untuk mencapai model prediktif:

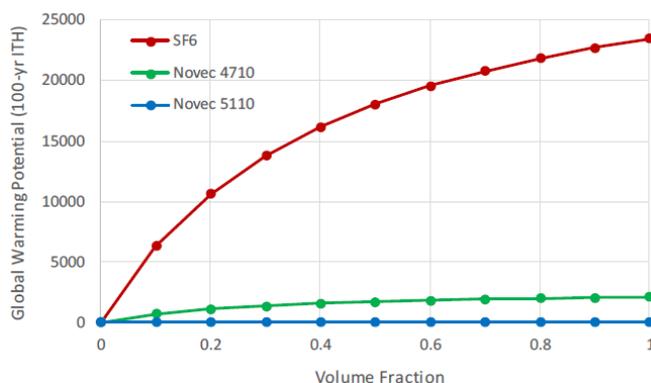
- Menyesuaikan pemodelan elektrostatik di semua domain dan boundary sistem berdasarkan geometri yang diterapkan
- Validasi model yang diterapkan dengan menyelidiki stabilitas pengukuran di (Comsol@ Multiphysics) menggunakan *finite element method* (FEM)
- Mengamati persebaran medan listrik sistem isolasi hybrid dengan mengubah jarak tip-planar
- Menyelidiki pengaruh permitivitas relatif bahan dielektrik padat terhadap distribusi medan listrik pada sistem isolasi hybrid.

Pengembangan desain model untuk mengetahui karakteristik sebaran medan listrik dilakukan berdasarkan pada studi komprehensif, mulai dari latar belakang diperlukannya sistem alternatif hingga ke hipotesis pemodelan sistem hybrid.

1.1. Solusi Gas Alternatif Pengganti SF₆

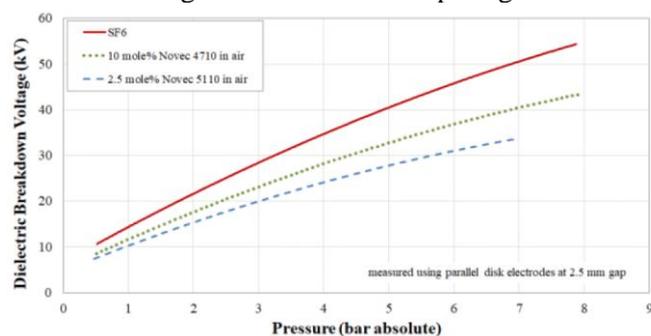
Selama beberapa dekade penelitian telah dilakukan untuk menemukan gas alternatif SF₆. Di samping pertimbangan potensi pemanasan global (GWP) yang lebih rendah, gas alternatif memiliki karakteristik dan kombinasi yang unik sebagai dielektrik. Gas alternatif juga harus memiliki kekuatan dielektrik yang baik dan dapat diterima untuk berbagai kondisi lingkungan. Selain itu, stabilitas kekuatan dielektrik diperlukan untuk melindungi korosi dan efek merugikan lainnya pada komponen listrik [1], [2], [3], [4].

Penelitian terbaru terhadap pecobaan ratusan senyawa, menunjukkan ada dua potensi senyawa pengganti SF₆, pertama adalah C₄ fluorinated nitrile (C₄F₇N) dan yang kedua C₅ fluorinated ketone (C₅F₁₀O) [1]. Kedua senyawa baru ini dikomersialkan dengan nama dagang 3M™ Novec™ 4710 Insulating Gas dan 3M™ Novec™ 5110 Insulating Gas. Penelitian yang dilakukan oleh Ang [5] tentang potensi pemanasan global (GWP) menunjukkan perbedaan yang signifikan antara SF₆ dan dua senyawa baru Novec 4710, dan, Novec 5110 dengan campuran konsentrasi CO₂.



Gambar 1. Nilai GWP Berbagai Gas Sebagai Fungsi Fraksi Volume CO₂ [5].

Hasil pada Gambar 1 menunjukkan bahwa kedua senyawa baru tersebut memiliki potensi pemanasan global yang jauh lebih kecil yakni sebesar 99% dibandingkan dengan SF₆. Selain itu untuk tegangan tembus dari kedua gas tersebut adalah seperti gambar di bawah.



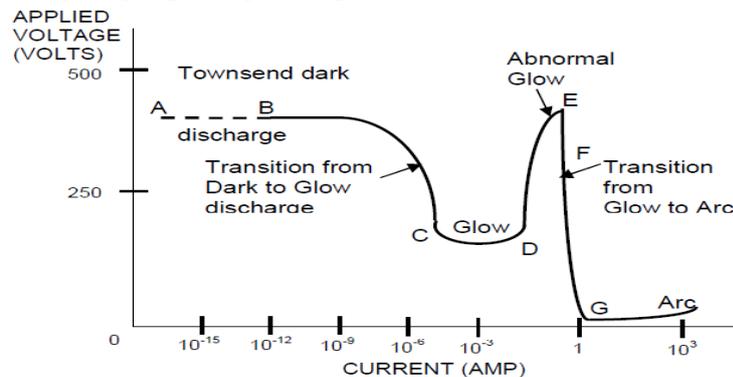
Gambar 2. Kekuatan Dielektrik Campuran Novec 4710/Udara dan Novec 5110/Udara vs SF₆ Murni [5].

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, tegangan tembus sebesar 24 kV dan 21 kV untuk 10% mol Novec 4710 dan 2,5% mol Novec 5110 di udara setara dengan sekitar 84% dan 86% kekuatan dielektrik kinerja gas SF₆ murni.

1.2. Kerusakan Dielektrik Padat dan Gas (Hybrid)

Sistem tegangan tinggi memiliki konfigurasi yang kompleks yang didukung oleh banyak komponen seperti: unit pembangkit, jaringan transmisi jarak jauh, distribusi untuk penyaluran daya listrik lokal. Terkait dengan hal ini, berbagai komponen listrik harus disesuaikan dengan kebutuhan isolasi yang tepat untuk mendukung pengoperasian komponen [6]. Umur pakai isolasi bahan listrik merupakan hal yang sangat penting. Selain itu pemeliharaan dan pemantauan komponen listrik secara berkala merupakan persyaratan penting dalam pengelolaan aset yang sudah ada dan yang direncanakan dalam sistem tenaga listrik [7].

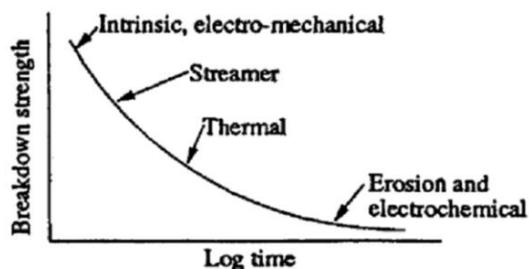
Dielektrik yang paling banyak digunakan adalah gas. Di antara banyak gas, udara adalah yang paling banyak digunakan dan diikuti oleh jenis lain seperti SF₆, N₂, CO₂. Gas memiliki molekul netral dan karenanya baik untuk isolasi listrik [8]. Dalam kondisi tertentu, tegangan tembus terjadi dan arus mengalir melalui gas [9]. Beberapa fenomena dikaitkan dengan pelepasan dielektrik dalam gas. Di antaranya adalah percikan, pelepasan gelap (Townsend), pendaran, korona, dan busur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Karakteristik Tegangan DC vs Arus yang Mengalir antara Dua Elektroda Planar pada Pelepasan Listrik [10].

Terdapat dua kondisi yang memicu pelepasan listrik dalam medium gas: gas netral dan adanya medan listrik tinggi yang terus-menerus untuk memungkinkan pelepasan tersebut. Ketika tegangan diberikan, berbagai fenomena terjadi: Pertama tegangan rendah diberikan, arus kecil melewati isolasi gas di antara dua elektroda tanpa mengubah sifat listrik. Yang kedua, jika tegangan yang diberikan jauh lebih besar dari kekuatan dielektriknya kerusakan terjadi dan arus listrik mengalir tajam. Tegangan maksimum yang diberikan yang terhubung ke isolasi dan kerusakan itu terjadi disebut *breakdown voltage*. Untuk fenomena *breakdown voltage*, sifat listrik gas harus dipelajari secara mendalam. Ada dua jenis pelepasan listrik sebagai proses terbentuknya arus yang dihasilkan dalam gas, yaitu pelepasan tak berkelanjutan dan pelepasan berlanjut. Transisi pelepasan tak berkelanjutan menjadi pelepasan berkelanjutan adalah kerusakan dalam gas (percikan api). Arus tinggi yang mengalir melalui elektroda terjadi karena ionisasi di mana ion dan elektron menghasilkan atom atau molekul netral. Dan elektron mengalir melalui anoda ke katoda elektroda [6].

Setelah kerusakan pada benda padat terjadi, material padat akan mengalami kerusakan permanen. Di sisi lain, gas akan memulihkan sebagian kekuatan dielektriknya setelah menghilangkan medan listrik yang memicu kerusakan. Lebih jauh, terdapat berbagai mekanisme kerusakan seperti yang ditampilkan pada gambar 4 di bawah ini,

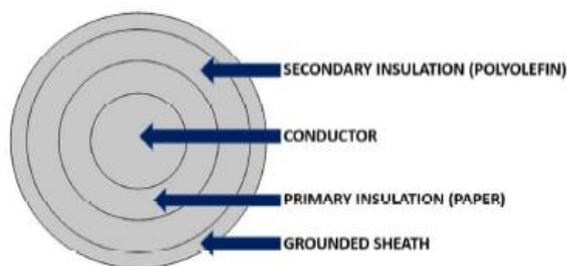


Gambar 4. Variasi Kerusakan Isolasi Setelah Dihubungkan ke Tegangan sebagai Fungsi Waktu [6]

Oleh karena itu, kajian mendalam mengenai berbagai sifat kelistrikan gas dan dielektrik padat maupun sangatlah penting.

1.3. Hubungan Breakdown Voltage dan Relative Permittivity

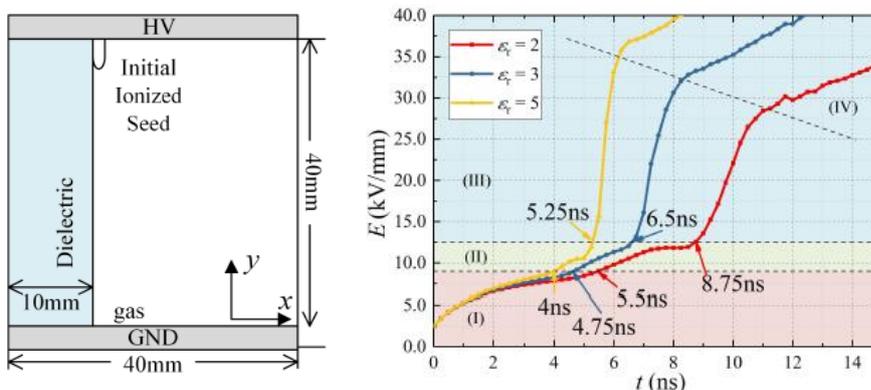
Johri dkk. [11] menyatakan bahwa dalam kasus arus DC efek kapasitansi tetap pada isolasi kabel dapat diabaikan. Nilai konduktivitas listrik bergantung pada suhu dan distribusi medan listrik untuk tegangan listrik keseluruhan di sepanjang isolasi. Di sisi lain, di bawah medan listrik bolak-balik, permitivitas sangat dipertimbangkan. Permitivitas dielektrik memengaruhi pengurangan besaran listrik di dalam antarmuka dielektrik padat dengan medan listrik eksternal. Selain itu, studi tentang nilai permitivitas non-linier dalam geometri silinder ditunjukkan pada Gambar 5 untuk mengetahui distribusi medan listrik.



Gambar 5: Geometri kabel 2D dengan nilai Permittivitas Relatif yang berbeda [11]

Nilai permitivitas relatif setiap bagian berbeda-beda, tergantung pada suhu dan koefisien material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa resultan distribusi medan listrik berubah karena perbedaan permitivitas relatif, di mana medan listrik yang lebih tinggi muncul pada nilai medan listrik yang lebih rendah.

Tambahan, sebuah studi yang dilakukan oleh Xiaoran dkk. [12] tentang pita permukaan yang berinteraksi dengan dielektrik mencoba mengidentifikasi pengaruh permitivitas dielektrik pada pelepasan permukaan. Sistem dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 6 di bawah.



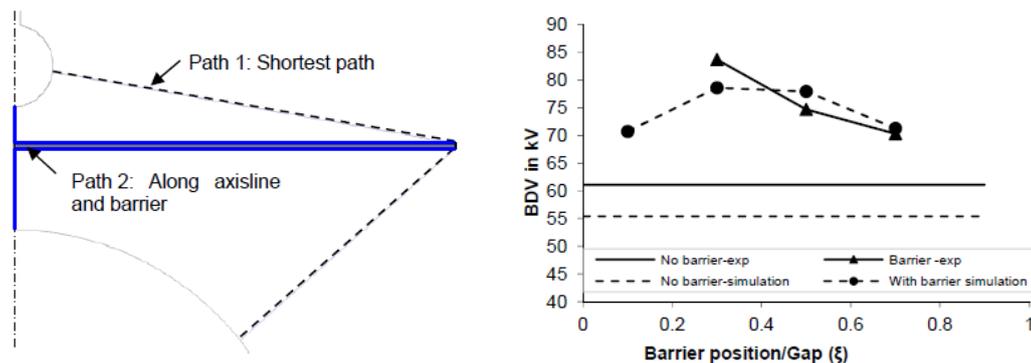
Gambar 6. Domain Komputasi Streamer dan Maksimum Medan Listrik Terhadap Waktu Dielektrik dengan Permittivitas Relatif 2, 3, 5.

Studi dalam penelitian [12] mensimulasikan geometri gambar dengan memvariasikan nilai dielektrik 2,3, dan 5. Permukaan awal konduktor ditempatkan pada jarak 0,5 mm dari dielektrik, dan simulasi desain hingga 15 ns. Hasilnya menunjukkan bahwa, dengan permitivitas relatif yang lebih tinggi polarisasi dielektrik akan lebih kuat. Lebih jauh, medan listrik maksimum meningkat sesuai dengan peningkatan permitivitas relatif saat perambatan permukaan streamer dimulai lebih awal. Selain itu, medan listrik juga lebih tinggi selama tahap perambatan permukaan. Kesimpulannya, permitivitas relatif yang lebih tinggi mengarah pada transisi yang lebih cepat ke permukaan streamer.

1.4. Breakdown Voltage dari Hybrid Dielectric (Gas and Solid) Sistem

Pada pengaruh dielektrik padat sebagai penghalang dalam isolasi gas, Ramesh et al. [13] mempelajari model prediktif tegangan tembus dengan membandingkan hasil simulasi dan eksperimen. Geometri (penghalang atau dielektrik padat) merupakan hambatan prediktif sekaligus pemicu akumulasi muatan permukaan di sepanjang spacer atau dielektrik padat. Beberapa metode sistematis dilakukan untuk menemukan model prediktif tegangan tembus.

Pada metode ini mereka menerapkan akumulasi muatan ion positif yang tersebar di sepanjang permukaan bahan dielektrik. Selain itu, jalur terpendek antara elektroda juga dipertimbangkan untuk mengetahui prediksi tegangan tembus yang baik. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, model prediksi tegangan tembus dapat diterapkan dengan mempertimbangkan kriteria dan kondisi awal yang diketahui.



Gambar 7. Geometri Sistem dan Nilai Tegangan Tembus

Dalam keadaan nyata, sebagian besar geometri tersebut diterapkan dalam sistem HVDC, misalnya, *spacer* dalam saluran berisolasi gas (GIL) [13]. Lebih jauh lagi, penelitian terkini yang dilakukan oleh Tremas, dkk [14] tentang pengaruh sifat material padat terhadap timbulnya lucutan merayap di udara mencoba mengetahui karakterisasi urutan kejadian pra-kerusakan yang memicu kerusakan dengan melakukan pendekatan eksperimental. Berdasarkan informasi visualisasi dan pengukuran arus inisiasi dan perambatan streamer pada permukaan padat, medan listrik akan meningkat pada *triple points* (padat, elektroda, udara) dengan adanya material dielektrik padat. Selain itu, inisiasi streamer tidak hanya dipengaruhi oleh medan listrik, tetapi juga oleh parameter lain seperti kerapatan muatan permukaan, sifat material, dan sebagainya.

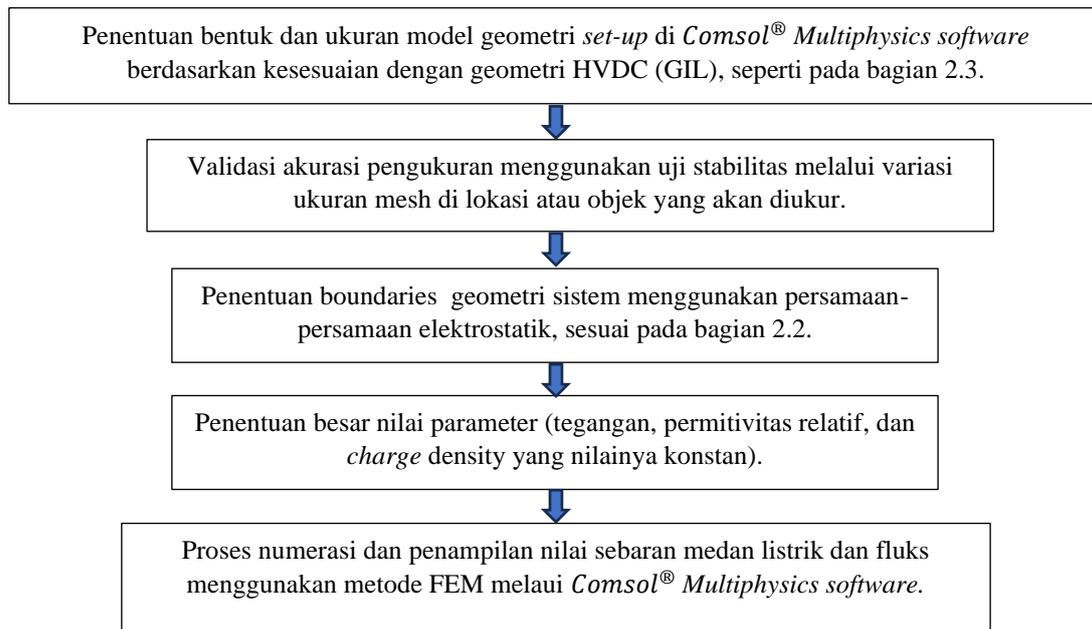
2. METODE PENELITIAN

2.1. Finite Element Method Menggunakan Comsol® Multiphysics

Finite element method (FEM) merupakan salah satu teknik numerik untuk menyelesaikan masalah terdefinisi yang digambarkan dengan persamaan diferensial parsial atau diformulasikan sebagai minimisasi fungsional. Integrasi *finite element* menjadi perhatian utama. Fungsi perkiraan dalam *finite element* ditentukan dalam bentuk nilai nodal dari bagian geometri yang dicari. Objek fisik geometri kontinu didiskritisasi menjadi *finite element* dengan nilai nodal yang tidak terdefinisi. Sistem persamaan aljabar linier dapat ditentukan untuk masalah linier. Nilai *finite element* dapat ditemukan menggunakan nilai nodal. Dalam metode *finite element*, ada dua fitur

yang diterapkan: Pertama adalah perkiraan bagian-bagian kecil dari fisik geometri yang memberikan hasil yang akurat bahkan dengan fungsi perkiraan sederhana (menambah jumlah elemen untuk mendapatkan lebih banyak presisi). Yang kedua adalah perkiraan lokalitas yang mengarah ke sistem persamaan jarang untuk sistem terdiskritisasi untuk menyelesaikan masalah dengan mengandung sejumlah besar nodal yang tidak diketahui [15].

Dalam penelitian ini, untuk menyelesaikan elemen hingga kompleks pada model sistem, *Comsol® Multiphysics software* diterapkan khususnya untuk menyelesaikan model elektrostatik pada domain geometri yang ditentukan. Perangkat lunak ini dianggap sebagai analisis finit lintas platform, pemecah masalah, dan simulasi multifisika. Selain itu, perangkat lunak ini dapat dikontrol secara eksternal dari LiveLink untuk MATLAB, API untuk Java, dan Autodesk Inventor. Adapun tahapan penelitian sehingga mencapai objektif yang diinginkan adalah sebagai berikut:



2.2. Persamaan *Electrostatics*

Nilai medan listrik E didefinisikan dengan menggunakan persamaan Poisson (1) untuk potensial listrik V:

$$\nabla^2 V = \frac{-\rho_v}{\epsilon} \quad (1)$$

Dimana $-\rho_v$ adalah kerapatan muatan volume untuk geometri yang diterapkan, ϵ adalah permitivitas relatif material. Dengan menambahkan kerapatan muatan permukaan $-\rho_s$ pada persamaan Poisson untuk potensial listrik V di atas, hubungan antara V dan $-\rho_s$ (2) dapat dikembangkan sebagai:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) = -(\rho_v + \delta_s \rho_s) \quad (2)$$

Dimana δ_s adalah pemetaan kerapatan muatan permukaan ρ_s pada domain antarmuka material gas-dielektrik ke sel grid yang berdekatan dengan dielektrik. Untuk mendefinisikan medan listrik di semua domain geometri terapan, konservasi muatan untuk persamaan Poisson adalah sebagai hasil substitusi dari $E = -\nabla V$.

Hal ini menandakan bahwa nilai medan listrik E adalah gradien potensial listrik yang berlawanan arah dengan medan listrik yang diberikan pada elektroda jarum. Pada antarmuka gas-dielektrik, nilai kerapatan muatan permukaan ρ_s dirumuskan sebagai (3):

$$\epsilon_2 E_2 - \epsilon_1 E_1 = \rho_s \quad (3)$$

Dimana ϵ_2 dan ϵ_1 adalah kuantifikasi permitivitas relatif dari kedua sisi material, dielektrik dan gas. Selain itu, kondisi awal beberapa batas sistem memiliki muatan nol. Dalam kasus ini

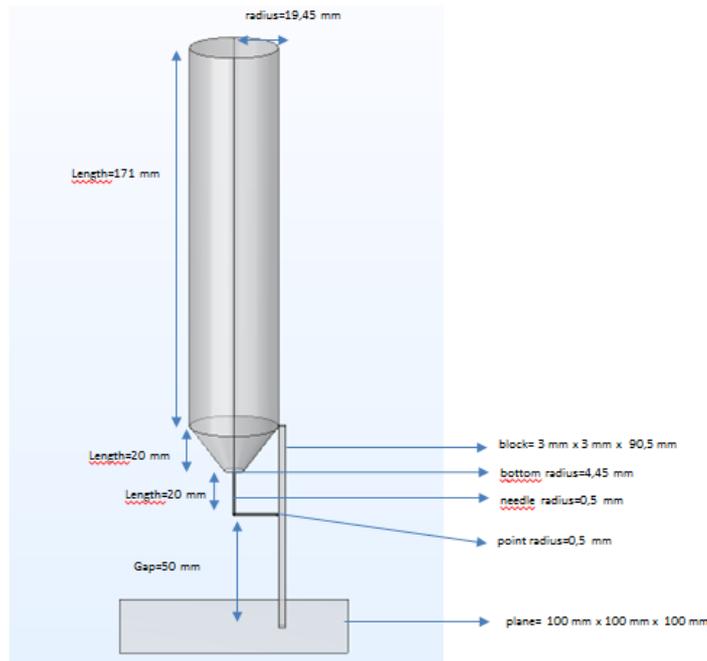
tidak ada kondisi eksternal yang memengaruhi sistem, sehingga perpindahan listrik dianggap nol (4):

$$D = \varepsilon E = 0 \quad (4)$$

Dimana D adalah perpindahan listrik.

2.3. Geometries

Dalam geometri 3D, sistem elektroda terdiri dari elektroda rode yang disambungkan ke ujung dan elektroda planar. Dielektrik padat juga dimasukkan di antara sistem elektroda. Ujung yang dihubungkan ke material dielektrik padat memiliki radius kelengkungan 0,5 mm. Ukuran semua sistem batas dirinci dalam Gambar 8. Untuk kondisi itu sendiri, tegangan yang diberikan pada elektroda ujung rode adalah 50 kV. Dan untuk material dielektrik, udara dan dielektrik padat adalah objek domain.



Gambar 8. Dimensi 3D Geometri.

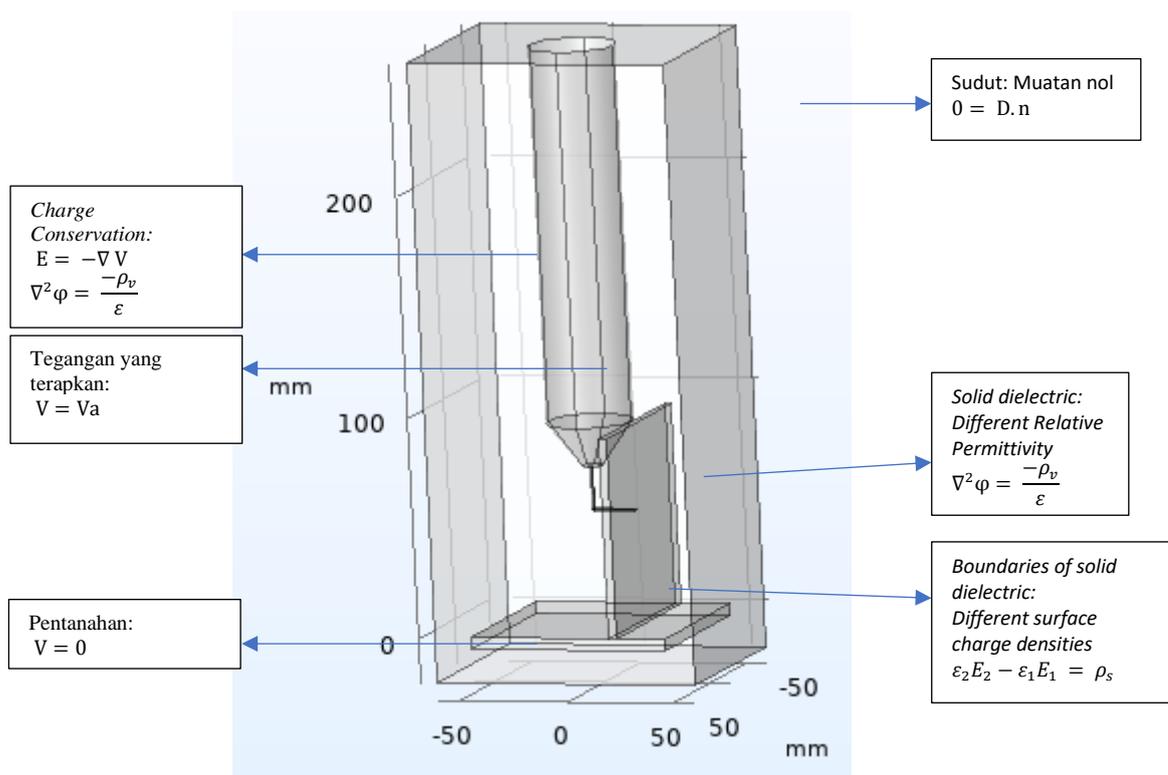
2.4. Validasi Model yang Diimplementasikan

Sebelum menuju ke simulasi dan hasil, model harus divalidasi dalam kondisi tertentu. Untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi hasil simulasi, dilakukan kajian tentang kestabilan *meshing* dan dampak ukuran domain serta dibandingkan dengan nilai teoritis. Kajian validasi ini dilakukan pada geometri 3D yang hanya perlu dilakukan pengukuran *meshing* untuk mengetahui keakuratan hasil karena ukuran batas memiliki pengaruh yang dapat diabaikan terhadap kestabilan simulasi.

Hasil terpenting dalam simulasi tersebut adalah nilai maksimum medan listrik pada ujung. Nilai ini sangat rentan terhadap ukuran mesh dan geometri yang diterapkan. Untuk mengetahui dengan baik pengaruh *meshing* dan ukuran domain, fungsi *parameter sweep* dalam *software Comsol® Multiphysics* diterapkan.

2.5. 3D Pemodelan Batas Sistem Geometri

Nilai-nilai permitivitas relatif yang berbeda muncul pada material padat dengan titik jarum untuk model 3D pada kondisi elektrostatik. Dan variasi kerapatan muatan permukaan juga didefinisikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi listrik di sekitar tepi dielektrik padat seperti yang digambarkan pada Gambar 9.

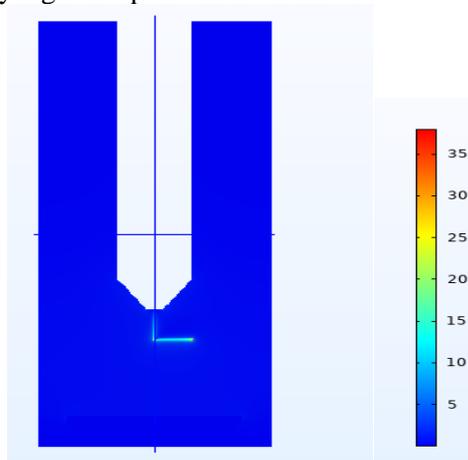


Gambar 9. 3D Kondisi Boundaries.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan simulasi adalah untuk mengamati fenomena yang terjadi menurut parameter yang diterapkan. Tujuan utama dari semua simulasi adalah untuk mengamati distribusi medan listrik dalam domain yang diinginkan. Untuk simulasi 3D, sifat listrik dan ukuran geometri diamati dengan *parameter sweep*. Nilai-nilai permitivitas relatif dan tegangan disimulasikan secara simultan untuk mengetahui karakteristik dan mekanisme *breakdown voltage*.

Untuk 3D seperti yang digambarkan pada Gambar 10, distribusi medan listrik terjadi di semua arah. Medan listrik akan intensif saat berada di sekitar jarum tempat tegangan diterapkan. Besarnya tegangan yang diterapkan dijaga konstan pada 50 kV. Planar dihubungkan dengan ujung elektroda. Keakuratan pengukuran pada ujung jarum tidak sepenuhnya akurat karena keterbatasan metode diskritisasi element di ujung-ujung konduktor. Sehingga perlu studi stabilisasi model untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Selain itu, variasi permitivitas relatif disajikan untuk mewakili berbagai bahan padat yang diterapkan dalam sistem.

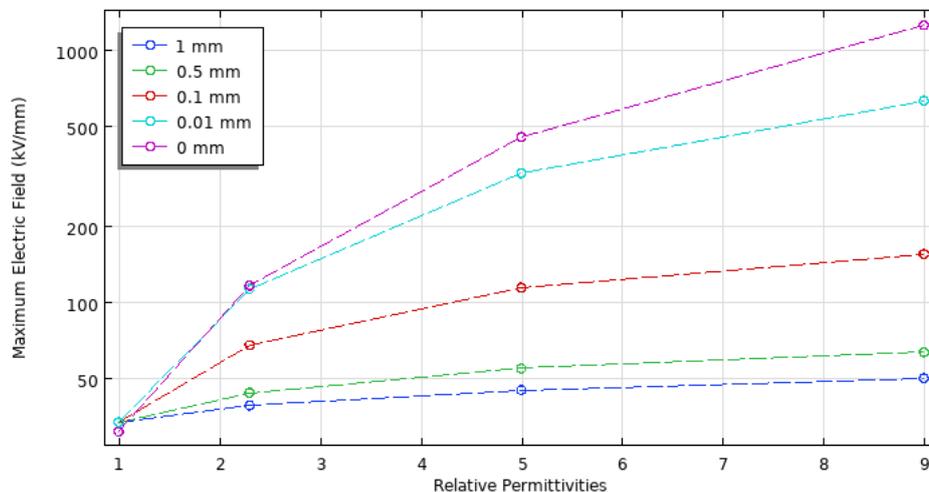


Gambar 10. Irisan Medan Listrik 3D (kV/mm) di Tengah Domain.

Fokus perhitungan numerik 3D adalah untuk mengetahui karakteristik distribusi medan listrik dalam hal munculnya dielektrik padat. Oleh karena itu, fokus simulasi adalah untuk mengetahui karakteristik evolusi medan listrik saat tegangan dan permitivitas relatif divariasikan. Serta mengamati perubahan nilai garis-garis medan listrik pada sistem hibrid tersebut.

3.1. Variasi Nilai Maximal Medan Listrik antara Gap Ujung Jarum Konduktor dan Dielektrik

Keberadaan dielektrik padat pada isolasi gas telah banyak dilakukan oleh para peneliti [1]. Dalam geometri nyata terdapat area yang memiliki tiga material antarmuka, misalnya spacer padat pada saluran isolasi gas (GIL). Area tersebut adalah domain konduktor, domain dielektrik gas, dan domain dielektrik padat. Lebih jauh, medan listrik maksimum juga terjadi pada tiga persimpangan domain tempat sebagian besar kerusakan dimulai [16]. Oleh karena itu, diperlukan penyelidikan medan listrik yang berkaitan dengan tiga domain yang saling bersinggungan. Untuk mengetahui karakteristiknya, titik diplot pada ujung jarum tempat ketiga domain tersebut bersinggungan.



Gambar 11. Maksimum Medan Listrik Berdasarkan Permittivitas Relatif dan Variasi Celah (Titik-Dielektrik).

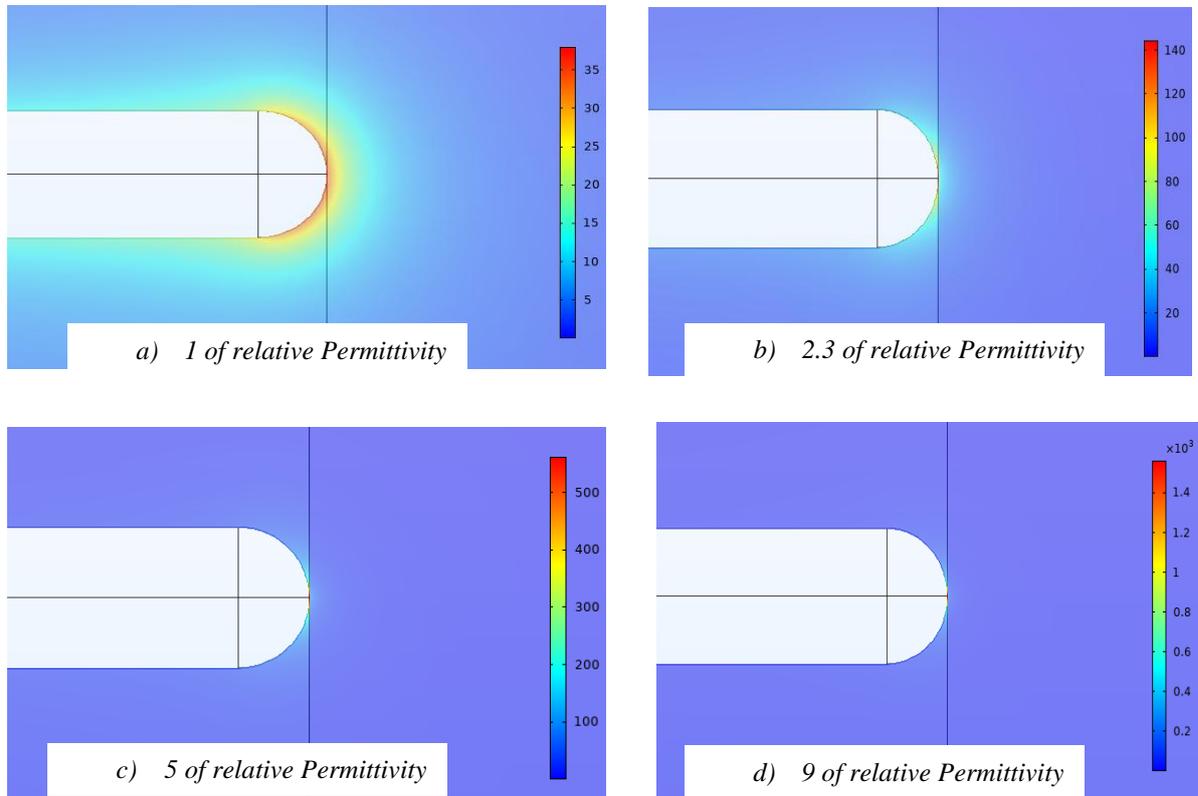
Untuk simulasi, jarak celah (ujung elektroda-bidang) yang berbeda disimulasikan. Jarak didiskritisasi dari 0 hingga 1 mm. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11, medan listrik maksimum bervariasi secara signifikan berdasarkan permitivitas relatif dan tegangan yang diterapkan. Untuk kondisi awal pada permitivitas relatif 1, nilai medan listrik maksimum adalah sama. Selain itu, medan listrik maksimum untuk antarmuka ujung-planar sedikit berbeda dari yang lain karena masalah akurasi metode FEM. Oleh karena itu, jarak celah nol (antarmuka ujung padat) diterapkan untuk mengetahui lebih lanjut distribusi medan listrik di domain yang diinginkan terutama di tepi bahan dielektrik padat.

3.2. Pengaruh Permittifitas Relatif Terhadap Medan Listrik

Dalam simulasi ini, distribusi medan listrik di sekitar ujung jarum diintensifkan untuk mengamati karakteristik evolusi medan listrik. Di sini, jarum atau konduktor berinteraksi dengan material dielektrik.

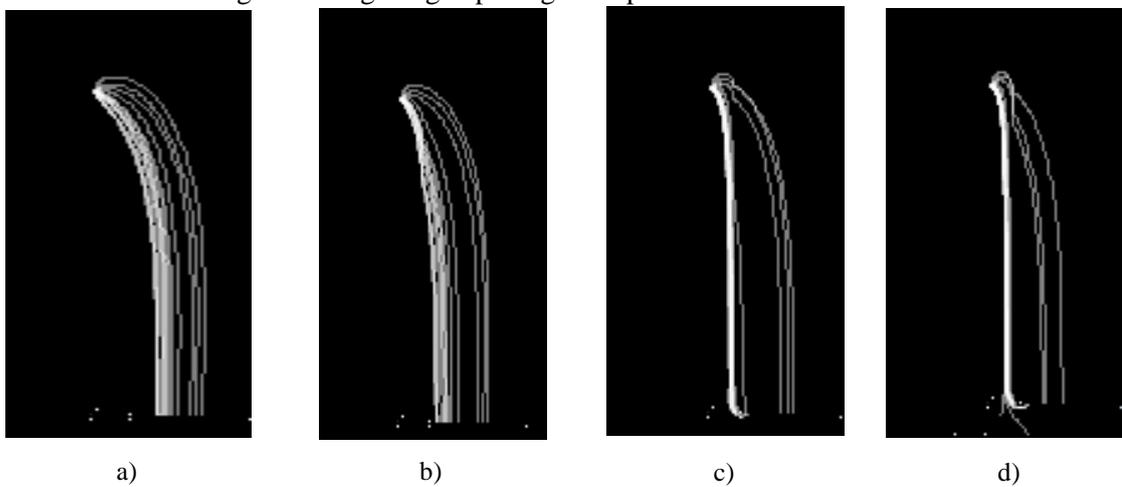
Permittivitas relatif yang berbeda diterapkan pada material dielektrik padat. Distribusi medan listrik diamati dengan permitivitas relatif yang bervariasi dari 1 (udara), 2,3 (PP), 5 (kaca) hingga 9 (alumina). Untuk hasil seperti yang disajikan pada Gambar 12, terlihat bahwa evolusi dan distribusi medan listrik menyebar ke semua arah tanpa penahanan pada nilai permitivitas relatif 1. Dan besarnya medan bersifat linier dengan diferensiasi jauh. Di sisi lain, medan listrik tidak menyebar secara linier dalam domain dielektrik padat jika permitivitas relatif lebih dari 1. Gambar 12 menunjukkan permitivitas relatif material yang lebih tinggi melemahkan medan listrik di

dalam material padat, tetapi medan listrik di tepi dielektrik padat dan gas akan meningkat secara signifikan. Selain itu, untuk mengetahui konsentrasi medan listrik, model *streamline* akan dilakukan.



Gambar 12. Irisan Medan Listrik Berdasarkan Variasi Permittivitas Relatif.

Garis-garis medan listrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13 adalah representasi dari permittivitas relatif yang berbeda. Garis arus terkonsentrasi di ujung elektroda dan menyebar ke semua arah ke plat (pentanahan). Hasilnya dengan jelas menunjukkan bahwa garis arus medan listrik menyebar secara linier dari ujung ke bahan dielektrik pada 1 permittivitas relatif (sama dengan gas), kemudian ke arah plat (pentanahan). Saat ada peningkatan nilai permittivitas relatif, medan listrik tidak menyebar secara linier dalam bahan dielektrik padat, dan medan akan lebih terkonsentrasi di sekitar tepi dielektrik gas-padat. Hal ini menguatkan bahwa medan listrik maksimum akan meningkat seiring dengan peningkatan permittivitas.



Gambar 13. Permittivitas Relatif Arus Medan Listrik: a)1, b) 2.3, c) 5, d) 9.

4. KESIMPULAN

Nilai parameter dielektrik padat berupa relatif permitivitas bahan divariasikan dengan jarak (gap antara konduktor tegangan tinggi dengan bahan padat) dan variasi tegangan tinggi menggunakan *Comsol® Multiphysics* untuk mengetahui karakteristik sistem hibrid yang berupa evolusi atau perubahan medan listrik di model sistem.

Dengan menggunakan metode komputasi dengan menerapkan model elektrostatik, hasilnya: Pertama, maksimum medan listrik akan bervariasi secara signifikan menurut permitivitas relatif dan jarak titik-dielektrik (gap). Maksimum medan listrik meningkat jika ukuran celah (ujung elektroda-planar) lebih pendek dan medan listrik maksimum sebanding dengan permitivitas relatif. Kedua, permitivitas relatif yang lebih tinggi dari dielektrik padat memicu nilai medan listrik yang lebih kecil dalam dielektrik padat, tetapi medan listrik di tepi dielektrik padat dan gas meningkat secara signifikan. Medan listrik tidak menyebar secara linier dalam bahan dielektrik padat dan lebih terkonsentrasi di sekitar tepi dielektrik padat.

Pemodelan ini memerlukan proses validasi dengan menguji model di laboratorium tegangan tinggi untuk memastikan apakah model bisa diterapkan untuk penelitian lanjutan. Kemudian di pemodelan lanjutan, penambahan parameter *surface charge density*, *charge density*, suhu dan parameter eksternal atau internal lainnya bisa dipertimbangkan agar pemodelan lebih mendekati kondisi ril. Dengan mendekati kondisi sebenarnya, pilihan medium gas tertentu bisa diuji untuk mensimulasikan sistem alternatif insulasi gas tegangan tinggi yang ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. G. Owens, "Greenhouse Gas Emission Reductions through use of a Sustainable Alternative to SF₆," dalam *Electrical Insulation Conference (EIC)*, Montréal, 2016.
- [2] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Guide for Sulphur Hexafluoride (SF₆) Gas Handling for High-Voltage," IEEE, New York, 2011.
- [3] P. Glaubitz, S. Stangherlin, J.-M. Biasse, F. Meyer, M. Dallet, M. Prüfert, R. Kurte, T. Saida, K. Uehara, P. Prieur, E. Kynast, H. Ito, E. Kynast, A. Janssen, R. Smeets dan D. Dufournet, "CIGRE Position Paper on the Application of SF₆ in Transmission and Distribution Networks," *ELECTRA*, 2014.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Climate Change 1995: The Science of Climate Change in Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change," Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [5] A. Xiao, J. G. Owens, J. Bonk, A. Zhang, C. Wang dan Y. Tu, "Environmentally Friendly Insulating Gases as SF₆ Alternatives for Power Utilities," dalam *2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment*, Guangzhou.
- [6] M. Naidu dan V. Kamaraju, *High-Voltage Engineering*, New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2009.
- [7] E. Kuffel, W. Zaengl dan J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [8] D. KOCH, "SF₆ properties, and use in MV and HV switchgear," Schneider Electric, Grenoble, 2003.
- [9] L. G. Christophorou, J. K. Olthoff dan D. S. Green, "Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1978.
- [10] M. Mohamed Abdelrahman dan H. El-Khabeary, "Study of Three Different Types of Plasma Ion Sources," *Plasma Science and Technology*, vol. 11, no. Cairo, 2009.
- [11] J. Pranav dan C. C. Reddy, "Effect of Non-Linear Permittivity on Electric Field in Multi-layer Dielectrics in Cylindrical Geometry," *IEEE*, no. Peradeniya, 2019.

- [12] L. Xiaoran dan A. Sun, "A Computational Study of Negative Surface Discharges: Characteristics of Surface Streamers and Surface Charges," no. Xi'an, 2020.
- [13] M. Ramesh, R. Summer, S. Singh dan et al., "Application of streamer criteria for calculations of flashover voltages of gaseous insulation with solid dielectric barrier," dalam *Proceedings of 18th International Symposium on High Voltage Engineering*, Seoul, 2013.
- [14] L. Trémas, O. Lesaint, N. Bonifaci, B. Ohl dan F. Gentils, "Influence of the Solid Material Nature on the," *IEEE*, no. Grenoble, 2017.
- [15] G. P. Nikishkov, *Introduction to the Finite Element Method*, Aizu-Wakamatsu: University of Aizu, 2004.
- [16] C. Li dan et al., "Full Life Property of Surface Charge Accumulation on HVDC Spacers Considering Transient and Steady States," *IEEE*, vol. 26, no. Bologna, 2019.