



Simulasi Permittivitas Non Linier Spacer FGM-GIS

SATIA ZAPUTRA¹, SUWARNO², SYARIF HIDAYAT²

¹universitas Kebangsaan Republik Indonesia

²sekolah Tinggi Elektro Informatika Institut Teknologi Bandung

Email : satiazaputra3107@gmail.com

ABSTRAK

Spacer adalah isolator padat yang berfungsi untuk isolasi tegangan tinggi sekaligus penyangga mekanis konduktor fasa dalam kompartemen Gas Insulated Substation (GIS). Spacer terletak di daerah pertemuan simpang tiga (triple junction) GIS yaitu gas SF₆, resin epoksi dan kabel konduktor bertegangan tinggi. Akibatnya spacer menjadi peralatan isolasi padat yang paling lemah tautannya dalam menerima stress medan listrik tinggi. Masalah umum kegagalan isolasi spacer yang sering terjadi adalah meningkatnya distribusi medan listrik lokal pada daerah triple junction dan kontaminasi partikel konduktif yang menempel dipermukaan spacer sehingga memudahkan terjadi surface discharge. Teknik terbaru dalam mengontrol medan listrik tidak seragam ini dengan menggunakan material permittivitas non linier, Functionally Gradient Material (ϵ -FGM). Paper ini melaporkan studi simulasi komparasi penggunaan filler resin epoksi sebagai permittivitas non linier dalam memperbaiki kinerja komposit polimer resin epoksi untuk mengontrol medan listrik dipermukaan spacer GIS. Selanjutnya dari hasil analisa simulasi perhitungan medan listrik gradasi tersebut dibandingkan dengan ketersediaan material filler yang tersedia di kelompok material polar dielektrik seperti partikel keramik Al₂O₃, SiO₂, TiO₂, BaTiO₃ dan SrTiO₃. Hasil akhir simulasi permittivitas gradasi (non linier) terbaik adalah bentuk U-FGM dapat menurunkan intensitas kuat medan listrik lokal di dua daerah triple junction yaitu konduktor tegangan tinggi GIS dari 18 kV/cm menjadi 12 kV/cm dan di body enclosure GIS dari 8kV/cm menjadi 5 kV/cm.

Kata kunci: spacer FGM, resin epoksi, filler, surface discharge, permittivitas gradasi, medan listrik grading

ABSTRACT

Spacers are solid insulators that function for high isolation as well as mechanical support for the conductor phase in the Gas Insulated Substation (GIS) compartment. The spacers are located in the GIS triple junction, namely SF₆ gas, epoxy resin and high-voltage conductor cables. The result of the spacer is the bonding equipment that is the weakest bond in receiving electric field voltages. A common problem of failure is spacer insulation that often occurs is the distribution of the local electric field in the triple junction area and conductive particle contaminants that stick to the surface of the spacer, making it easier for surface discharge to occur. The latest technique to control this non-uniform electric field is by using a non-linear permittivity material, Functionally Gradient

Material (U-FGM). This paper reports a comparative simulation study of the use of epoxy resin as a non-linear permittivity in improving the performance of epoxy resin polymer composites to control the electric field on the surface of the GIS spacer. Furthermore, from the simulation results, the calculation of the gradation electric field is compared with the availability of filler material available in the polar dielectric material group such as ceramic particles Al₂O₃, SiO₂, TiO₂, BaTiO₃ and SrTiO₃. The final result of the best (non-linear) permittivity simulation is that the U-FGM shape can reduce the intensity of the local electric field in two areas of three connections, namely the GIS high-voltage conductor from 18 kV/cm to 12 kV/cm and in the GIS body enclosure from 8kV/cm. cm to 5 kV/cm.

Keywords: *spacer FGM, epoxy resin, filler, surface discharge, permittivity grading, electric field grading*

1. PENDAHULUAN

Saat ini Gas Insulated Switchgear (GIS) merupakan gardu induk listrik yang paling banyak dikembangkan dan digunakan dalam sistem jaringan transmisi tegangan tinggi AC. Perkembangan teknologi pembangkitan energi listrikm terbaru seperti energi surya photovoltaic juga membutuhkan jaringan transmisi tegangan tinggi DC. Spacer menjadi salah satu peralatan isolasi GIS yang memegang peranan penting dalam keandalan isolasi GIS baik AC switchgear maupun DC switchgear untuk memberikan pelayanan kebutuhan listrik kepada konsumen secara kontinyu.

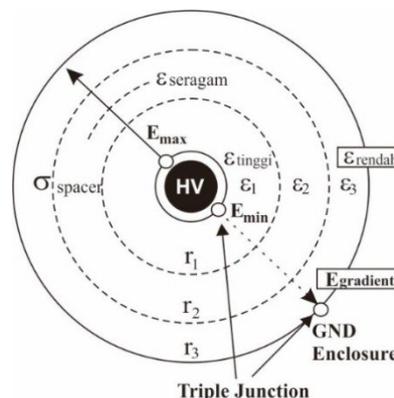
Spacer terletak di titik pertemuan triple junction (TJ) GIS : gas SF₆ , spacer dan konduktor HV. TJ ini menjadi titik kritis pertemuan terhadap kenaikan distribusi medan listrik lokal yang akan mengakibatkan mudahnya terjadi surface discharge dan corona discharge sebagai permasalahan utama dalam teknik isolasi dielektrik berlapis gas – padat di kegagalan isolasi spacer GIS. Dalam mengatasi surface discharge dilaporkan spacer dilapisi UV permukaan dengan empat macam skema pelapisan permukaan, antara lain pelapisan penuh (full coating), pelapisan terlokalisasi di dekat tegangan tinggi (dilapisi HV), di permukaan tengah (dilapisi tengah) dan dekat elektroda pembumian (dilapisi GND). Lapisan komposit polimer resin epoksi menggunakan pengisi partikel keramik BaTiO₃ (Jiang et al, 2020).

Salah satu teknologi dalam mengatur medan listrik menjadi rendah di titik kritis pertemuan Triple Junction (TJ) adalah dengan menggunakan material padat non liner dengan penerapan bahan bergradasi fungsional (FGM) pada spacer GIS. Peneliti lain telah mengembangkan spacer FGM tipe kerucut untuk switchgears insulated gas (GIS) kelas 245 kV. Spacer FGM yang dibuat berdasarkan ukuran sebenarnya (actual size) ini menggunakan distribusi spasial permitivitas dengan nilai $\epsilon_r=4-10$ dengan pengisi SrTiO₃ dan SiO₂. (N. Hayakawa, et al 2020)

2. FUNCTIONALLY GRADIENT MATERIAL (FGM)

2.1 Konsep Spacer FGM

Pada Gambar 1 , menjelaskan bahwa sifat dielektrik material padat spacer GIS terdiri dari permitivitas relatif (ϵ_r) dan konduktivitas (σ). Pembahasan masalah breakdown dielektrik berlapis bidang batas isolasi gas SF₆ - isolasi padat spacer sangat bermasalah di daerah kritis pertemuan triple junction GIS. Dari hasil studi penelitian menjelaskan penggunaan material spacer dengan permitivitas seragam (uniform) dan konstan tidak optimal dalam menghadapi kenaikan distribusi medan listrik lokal yang terjadi.



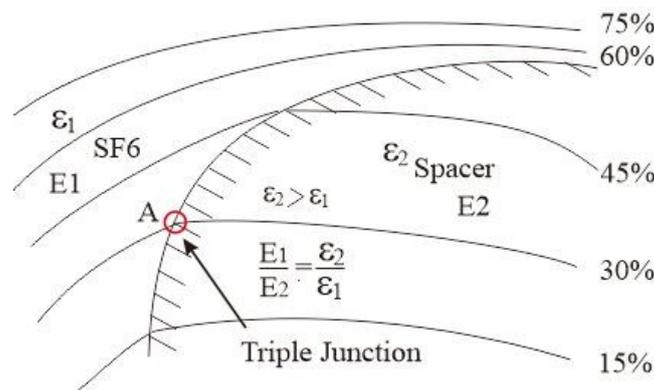
Gambar 1. Model spacer ϵ -FGM di TJ HV dan TJ GND

Untuk mengatasi kenaikan distribusi medan listrik lokal tidak seragam itu maka penggunaan material gradasi fungsional (FGM) menjadi solusi yang efektif dengan cara mengatur permitivitas grading (ϵ -FGM) dan konduktivitas grading (σ -FGM). Umumnya isolator padat spacer dengan permitivitas seragam dan konstans (Uniform) . Akibatnya distribusi medan listrik dibagian lapisan permukaan spacer akan maksimum nilainya (E_{max}) khususnya di daerah titik triple junction GIS, semakin berkurang distribusi spasial medan listriknya dari sumbu pusat elektroda HV secara radial.

Namun sebaliknya jika permitivitas spacer dibuat bertingkat (grading) maka distribusi spasial medan listriknya bisa dibuat terbalik menjadi minimum (E_{min}) di daerah titik triple junction GIS ini. Oleh karena itu penelitian spacer FGM terus mendapat perhatian khusus baik dari simulasi medan listrik maupun teknik pabrikan pembuatan material berdasarkan permitivitas dan konduktivitas non linernya.

2.2 Pengaturan medan listrik pada Triple Junction

Pada Gambar 2 , khususnya di titik A (triple junction) menjelaskan bahwa permasalahan spacer GIS pada bidang batas isolasi gas – padat adalah surface discharge atau corona discharge.



Gambar 2. Medan listrik pada isolasi dielektrik berlapis gas – padat

Medan listrik dengan permitivitas lebih rendah (gas) akan mengalami penekanan medan listrik dari permitivitas lebih tinggi (padat). Artinya medan listrik lokal yang terjadi pada titik A isolasi gas sangat tergantung dari perbandingan permitivitas bahan padat resin epoksi padat spacer. Dimisalkan kuat medan listrik E_2 spacer yang diberikan adalah 100kV/cm dengan panjang jarak dielektrik padat spacer 5 cm maka kekuatan dielektrik spacer menjadi 20kV/cm. Jika permitivitas spacer ($\epsilon=6$) maka kuat medan listrik pada gas menjadi $E_1 = 6 \times 20 \text{ kV/cm} = 120 \text{ kV/cm}$, sedangkan kekuatan dielektrik gas SF6 = 89 kV/cm sehingga sudah terjadi breakdown di gas SF6. Pada kondisi ini corona discharge sangat mempengaruhi terjadi surface discharge di permukaan spacer GIS. Oleh karena itu penerapan teknologi ion shielding dengan mengatur konduktivitas σ -FGM menjadi salah satu solusi dalam meningkatkan kinerja spacer FGM.

Sebaliknya dimisalkan kuat medan listrik gas $E_1 = 100 \text{ kV/cm}$ dengan panjang jarak ke material padat 5 cm, maka kekuatan dielektrik gas menjadi 20 kV/cm. Jika permitivitas gas ($\epsilon=1$) maka kuat medan listrik $E_2 = 20\text{kV}/6 = 3,33 \text{ kV/cm}$. Artinya semakin besar

permitivitas material padat spacer maka akan semakin kecil kuat medan listrik E_2 lokal di titik A yang ditanggung oleh spacer. Oleh karena itu penerapan teknologi mengatur permitivitas ϵ -FGM menjadi salah satu solusi juga dalam meningkat kinerja spacer FGM.

3. SIMULASI FEM SPACER ϵ -FGM

Sebelum melakukan pembuatan sample (bulk) spacer FGM secara rill , maka menggunakan simulasi FEM untuk melihat pengaruh permitivitas grading dapat dilakukan melalui software COMSOL Multyphysics terhadap medan listrik grading di sepanjang fungsi jarak radial spacer GIS.

Dengan menggunakan persamaan empiris teori medan sbb :

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = \rho_v \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \epsilon (-\nabla \varphi) = \rho_v \quad (5)$$

$$\nabla^2 \varphi = \frac{-\rho_v}{\epsilon} \quad (6)$$

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (7)$$

$$E = -\nabla V \quad (8)$$

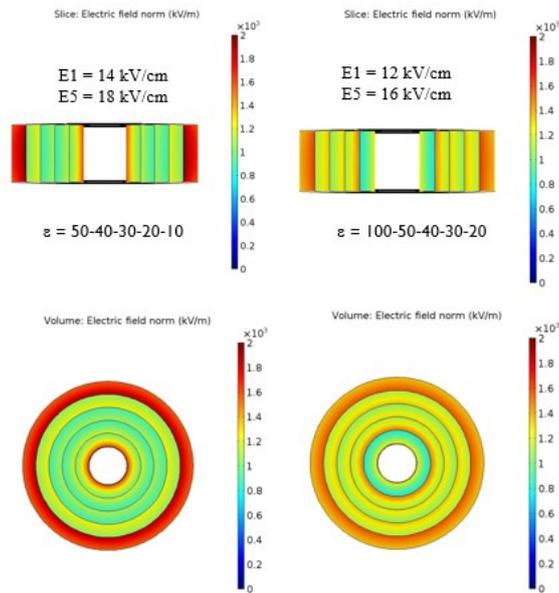
$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho_v$$

Intensitas medan listrik E merupakan integrasi dari muatan titik dan muatan garis pada suatu bidang permukaan dan ruang. Dalam menentukan D digunakan hukum gaus untuk menghitung E. Hukum gaus memberikan integral permukaan tertutup kerapatan fluks listrik (D) adalah sama dengan jumlah muatan dipermukaan tertutup itu. Dengan mencari nilai kerapatan muatan (ρ) di seluruh volume , maka akan memberikan jumlah muatan muatan ruang yang dimaksud.

Persamaan Maxwell digunakan dalam menghitung kerapatan muatan tersebut. Dengan asumsi dielektrik homogen dan isotropik maka persamaan 5 dapat diturunkan menjadi persamaan 6 yang merupakan persamaan Poisson. Dengan menganggap distribusi muatan secara merata dengan kepadatan kerapatan muatan volume sama dengan nol maka persamaan 6 dapat disederhanakan menjadi persamaan 7 Laplace. Selanjutnya kita menggunakan persamaan Laplace ini dalam simulasi FEM untuk memberikan fungsi potensial V dengan kondisi batas batas yang telah ditentukan. Persamaan 8 adalah kondisi input batas berbagai variasi permitivitas yang diinput dalam simulasi FEM - COMSOL Multyphysics untuk mendapatkan distribusi spasial medan listrik sebagai fungsi jarak radial dari spacer FGM ini. **(Pakalapati, et al 2020)**

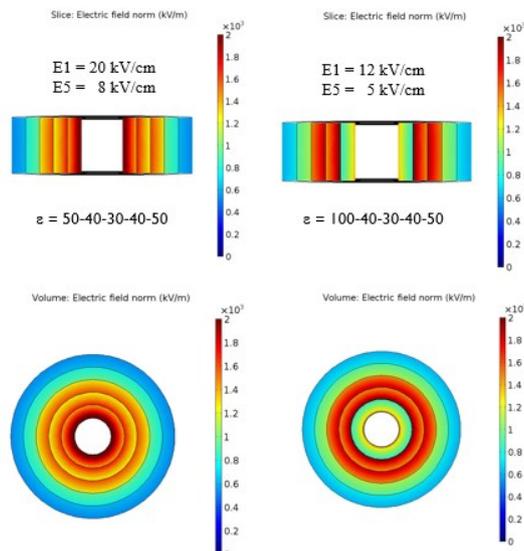
4. HASIL PENELITIAN SIMULASI MEDAN LISTRIK SPACER FGM

Berikut adalah contoh hasil simulasi medan listrik spacer FGM dengan tegangan kerja 150 kV. Variasi input permitivitas dibuat 5 layer dalam skala jarak radial spacer. Dengan titik kritis TJ HV di layer 1 dan TJ GND di layer 5.



Gambar 3. Model distribusi permitivitas liner menurun

Pada Gambar 3, material permitivitas spacer di desain dari nilai tinggi menurun ke nilai rendah. Gambar 3a dengan permitivitas $\epsilon=50-40-30-20-10$ dan gambar 3b, $\epsilon=100-50-40-30-20$. Terlihat dengan jelas bahwa pada layer 1 dan layer 5 menunjukkan kuat medan listrik di TJ HV dan TJ GND masih tinggi yaitu antara 12-18 kV/cm. Dengan demikian intensitas distribusi medan listrik dengan model distribusi permitivitas menurun dari nilai tinggi ke nilai rendah ini masih dapat menimbulkan surface discharge di permukaan spacer dan corona discharge di isolasi gas SF₆, khususnya pada daerah kritis triple junction.



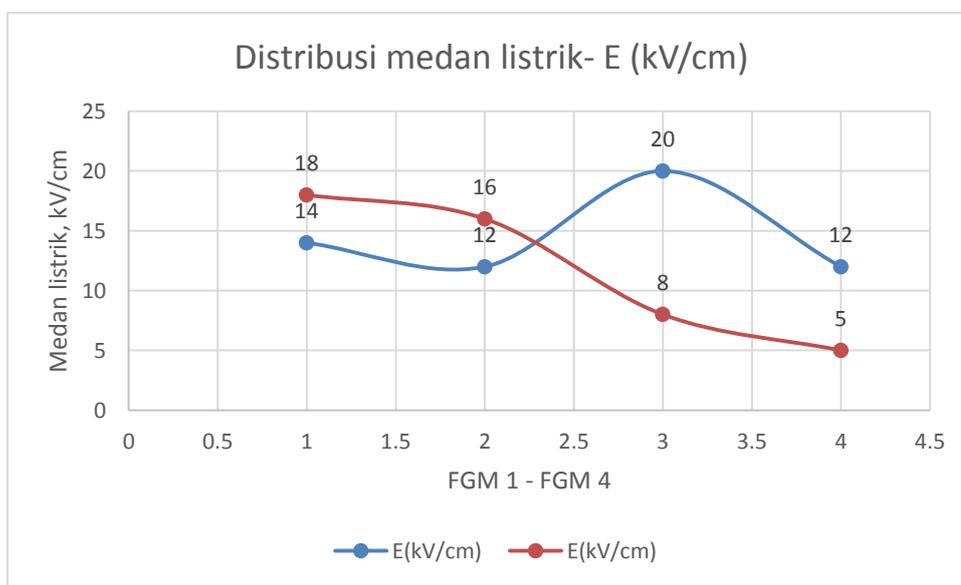
Gambar 4. Model distribusi permitivitas bentuk U-FGM (tinggi – rendah – tinggi)

Pada Gambar 4 , material non linear spacer di desain dengan distribusi permitivitas dari nilai tinggi – rendah – tinggi. Hasil simulasi gambar 4a , $\epsilon=50-40-30-40-50$ menunjukkan intensitas medan listrik pada layer 1 di TJ HV masih sangat tinggi yaitu 20 kV/cm namun menjadi rendah di TJ GND menjadi 8 kV/cm. Sedangkan pada gambar 4b , $\epsilon=100-40-30-40-50$ menunjukkan intensitas medan listrik di TJ HV menurun menjadi 12 kV/cm dan di TJ GND menurun menjadi 5kV/cm. Artinya model distribusi permitivitas bentuk nilai tinggi – rendah – tinggi adalah model distribusi terbaik dalam menurunkan kenaikan distribusi medan listrik lokal di daerah triple junction HV dan GND tangki enclosure GIS. Model distribusi permitivitas non linear ini dikenal dengan sebutan distribusi permitivitas bentuk U – FGM.

Dari Gambar 3 dan 4, selanjutnya hasil penelitian simulasi FEM Comsol ini dapat dibuat perbandingan penurunan intensitas medan listrik di daerah triple junction konduktor tegangan tinggi (TJ-HV) dan triple junction body enclosure (TJ-GND) dalam bentuk tabel 1 dibawah ini .

Table 1. Perbandingan simulasi kuat medan listrik spacer FGM

No	Spacer FGM	E(kV/cm)	E(kV/cm)
	Distribusi spasial permitivitas	TJ-HV	TJ-GND
1	Spacer FGM1 ($\epsilon=50-40-30-20-10$)	14	18
2	Spacer FGM2 ($e=100-50-40-30-20$)	12	16
3	Spacer FGM3 ($\epsilon=50-40-30-40-50$)	20	8
4	Spacer FGM4 ($e=100-40-30-40-50$)	12	5



Gambar 5. Model distribusi permitivitas bentuk U-FGM (tinggi – rendah – tinggi)

Dari komposisi simulasi distribusi permitivitas grading ini maka secara umum dapat dibagi dalam permitivitas tinggi dan rendah. Kita sudah mendapatkan informasi bahwa model distribusi permitivitas grading terbaik adalah distribusi bentuk U-FGM. Filler terbagi kedalam kelompok partikel polar dielektrik permitivitas rendah (Al_2O_3 , SiO_2 , GO) dan permitivitas tinggi

(TiO₂, BaTiO₃, SrTiO₃) Selanjutnya kita dapat melihat material filler dari resin epoksi yang tersedia di pasar dan mencoba melakukan percobaan eksperimen dengan material komposit antara resin epoksi dan fillernya seperti yang terlihat di tabel 2.

Table 2. Filler Resin Epoksi yang tersedia di pasar industry

No	Permittivitas (ϵ_r)	Filler	ϵ_r , 1kHz
1	Rendah	Al ₂ O ₃	9.3
2	Rendah	SiO ₂	4.5
3	Rendah	GO	7
4	Tinggi	TiO ₂	114
5	Tinggi	BaTiO ₃	80
6	Tinggi	SrTiO ₃	332

Dari hasil simulasi medan listrik spacer FGM pada gambar 3 dan gambar 4 , diperoleh 5 layer permittivitas grading terbaik adalah gambar 4b dengan komposisi ϵ -FGM = 100-40-30-40-50. Sample ϵ -FGM dibuat menjadi partisi partisi layer di dalam bulk, masing masing partisi layer mempunyai permittivitas berbeda beda sesuai dengan bentuk permittivitas grading yang kita design. Selanjutnya untuk fabrikasi sample dengan permittivitas grading ini bisa kita lakukan dengan perpaduan material permittivitas tinggi dan rendah. Untuk eksperimen permittivitas grading bisa dilakukan dengan mengambil ratio filler komposit permittivitas gabungan tinggi – rendah sebagai berikut :

1. Komposit filler : TiO₂/ Al₂O₃, TiO₂/SiO₂, TiO₂/GO
2. Komposit filler : BaTiO₃/Al₂O₃, BaTiO₃/SiO₂, BaTiO₃/GO,
3. Komposit filler : BaTiO₃/ Al₂O₃, BaTiO₃/SiO₂, BaTiO₃/GO

Peneliti Hidayat (**Hidayat, et al., 2016**) , telah melaporkan penggunaan filler BaTiO₃ (Barium Titanium Oxide) ditempatkan di bagian atas dan bawah bahan resin epoksi. Intensitas medan listrik maksimum pada spacer GIS 150 kV tanpa modifikasi adalah 138 kV/cm. Intensitas medan listrik maksimum masih di bawah breakdown medan listrik resin epoksi (197 kV/cm). Modifikasi FGM dengan lapisan Titanium Oxide (TiO₂) mengurangi medan listrik maksimum pada spacer menjadi 56 kV/cm.

Tantangan penelitian studi permittivitas filler resin epoksi untuk mendapat permittivitas grading ini adalah teknik mengatur fillernya menjadi tidak homogen sehingga antar lapisan model layer permittivitas menyatu (kontinyu) . Secara teknis dapat kita lakukan dengan mengatur volume ratio antara volume filler dengan volume epoxy-composite yang diubah ubah. Misalnya untuk model distribusi 5 layer partisi ϵ -FGM = **100-40-30-40-50** pada tabel 2. Komposisi filler yang digunakan untuk permittivitas grading tinggi adalah TiO₂/SiO₂. Dominan volume % permittivitas tinggi yang digunakan ada di partikel TiO₂.

Tabel 2. Ratio volume filler permittivitas tinggi

Partisi	partisi ϵ -FGM	Volume Filler %
Layer 1	$\epsilon_r = 100$	50
Layer 2	$\epsilon_r = 40$	38
Layer 3	$\epsilon_r = 30$	36
Layer 4	$\epsilon_r = 40$	38
Layer 5	$\epsilon_r = 50$	40

Sebaliknya untuk studi komparasi permitivitas grading dengan nilai rendah, ϵ -FGM = 7,5-4-3-4-7, dapat digunakan partikel SiO₂ sebagai filler utamanya seperti pada tabel 3. Salah satu tujuan dibuat permitivitas grading dengan nilai rendah agar tidak terlalu jauh loncat medan listrik yang terjadi di masing masing partisi 5 layer material spacer FGM.

Tabel 3. Ratio volume filler permitivitas rendah

Partisi	partisi ϵ -FGM	Volume Filler %
Layer 1	$\epsilon_r = 7,5$	50
Layer 2	$\epsilon_r = 4$	38
Layer 3	$\epsilon_r = 3$	36
Layer 4	$\epsilon_r = 4$	38
Layer 5	$\epsilon_r = 7$	40

Untuk penelitian selanjutnya dalam membuat sample material permitivitas grading di atas tersebut dapat menggunakan teknik pabrikasi partisi layer diskrit (stepwise) atau layer kontinyu. Pembuatan pabrikasi model spacer bentuk U-FGM sejalan dengan hasil penelitian pabrikasi spacer yangtelah dilakukan oleh peneliti **N. Hayakawa, et al (2020, 2012), T. Imai , et al (2019) H. Ju, et al (2011), M. Kurimoto, et al (2010).**

4. KESIMPULAN

Penelitian simulasi distribusi permitivitas gradasi telah dilakukan pada model spacer FGM. Diperoleh model permitivitas bentuk U-FGM (tinggi-rendah-tinggi) sangat baik dalam menurunkan intensitas medan listrik di TJ HV dan TJ GND dibandingkan dengan bentuk distribusi permitivitas menurun dari tinggi ke rendah. Hasil simulasi FEM diperoleh distribusi 5 layer permitivitas grading spacer terbaik adalah ϵ -FGM = 100-40-30-40-50 dengan kuat medan listrik di TJ HV = 12 kV/cm dan di TJ GND = 5 kV/cm. Dari hasil simulasi terbaik tersebut maka pembuatan sample ϵ -FGM dapat menggunakan gabungan komposisi filler dengan permitivitas tinggi dan permitivitas rendah. Untuk ϵ -FGM = 100-40-30-40-50 dapat menggunakan komposisi partikel TiO₂/SiO₂ atau BaTiO₃/SiO₂.

DAFTAR RUJUKAN

- Hayakawa, N. et al. (2020). Development of Cone-Type FGM Spacer for Actual Size GIS. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, (pp. 255-258). <https://doi.org/10.1109/CEIDP49254.2020.9437434>
- Hayakawa, N., J. Shimomura, T. Nakano, M. Hanai, K. Kato and H. Okubo (2012). Fabrication technique of permittivity graded materials (FGM) for disk-type solid insulator. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (pp. 32-35). <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2012.6378715>.
- Hidayat, S. F. Damanik and U. Khayam (2016). Electric field optimization on 150 kV GIS spacer using functionally gradient material. *2nd International Conference of*

- Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE)*, (pp. 254-259). <https://doi.org/10.1109/ICIMECE.2016.7910451>
- Imai, T. M. Takeuchi, Y. Hoshina, H. Kojima and N. Hayakawa (2019). Comparison of permittivity gradient in resin injected and simulated cone-shaped spacers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(5), 1678-1685. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008240>
- Jiang et al. (2020). The Influence of Surface UV-Coating on Electric Field Distribution and Flashover Voltage of Epoxy/Alumina Spacers. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, (pp. 1-4). <https://doi.org/10.1109/ICHVE49031.2020.9280022>
- Ju, H. B. Kim and K. Ko.(2011). *Optimal design of an elliptically graded permittivity spacer configuration in gas insulated switchgear*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(4), 1268-1273, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5976126>.
- Kurimoto, M. K. Kato, M. Hanai, Y. Hoshina, M. Takei and H. Okubo (2010). Application of functionally graded material for reducing electric field on electrode and spacer interface, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(1), 256-263. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5412025>
- Pakalapati, Janaki, Gundavarapu, Venkata N. Kumar, Duvvada, Deepak Chowdary and Bali, Sravana Kumar (2020). Study of electric field stress on the surface contour and at the triple junction in three phase GIS with FGM spacer under the depression defect. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 21(5), 20200080. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2020-0080>

Pertanyaan :

Bagaimana teknik pemasangan shielding pada spacer?

Jawaban :

menggunakan grading/layering