

## Review Pemodelan Rangkaian Listrik pada Fenomena Partial Discharge

Adi Nugraha<sup>1</sup>, Felycia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Banten.

### Informasi Artikel

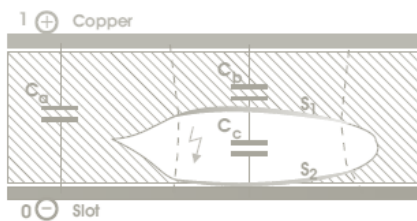
**Naskah Diterima :** 30 Mei 2024

**Direvisi :** 1 Juni 2024

**Disetujui :** 3 Juni 2024

**\*Korespondensi Penulis :**  
adi.n@untirta.ac.id

### Graphical abstract



### Abstract

Partial discharge is a voltage breakdown event caused by the inability of an insulation to withstand voltage. Partial discharge can occur on the inside, the insulation surface can even create a flame arc. PD modeling is put forward by experts and analyzed with mathematical models. PD experiments are carried out in 3 typical internal discharge, surface discharge and tip discharge. Different PD intensity results were obtained in each of these types.

**Keywords:** Partial Discharge, internal discharge, surface discharge, model PD

### Abstrak

Partial discharge merupakan suatu peristiwa tembusnya tegangan yang diakibatkan ketidakmampuan suatu insulasi menahan tegangan. Partial discharge dapat terjadi di bagian dalam, permukaan insulasi bahkan dapat menciptakan busur api. Pemodelan PD dikemukakan oleh para ahli dan dianalisis dengan model secara matematis. Percobaan adanya PD dilakukan dalam 3 tipikal yaitu internal discharge, surface discharge dan tip discharge. Diperoleh hasil intensitas PD yang berbeda beda pada masing masing tipikal tersebut.

**Kata kunci:** Partial Discharge, internal discharge, surface discharge, model PD

© 2024 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved.

## 1. PENDAHULUAN

Menurut IEC 60270 Partial Discharge adalah Discharge listrik yang menghubungkan sebagian isolasi antara konduktor dan yang mungkin juga ke konduktor yang berdekatan lainnya. Menurut [1] PD adalah pelepasan listrik yang sebagian menjembatani isolasi antara konduktor. Hal tersebut disebabkan oleh ketidaksempurnaan sebuah insulasi baik di bagian dalam maupun di sepanjang permukaan insulasi. Cacat ini bisa berupa inklusi gas yang mengandung void/rongga, bisa berupa retakan pada bahan padat atau gelembung dalam cairan. [2] Menjelaskan bahwa pengukuran dan identifikasi partial discharge (Partial discharge, PD) sangat penting untuk memantau kondisi transformator daya. Sejalan dengan hal tersebut, [3] Menjelaskan secara lengkap bahwa PD bukan hanya dapat terjadi pada Transformator saja, melainkan Partial discharge juga sering terjadi pada isolator peralatan bertegangan tinggi, seperti generator, motor, dan kabel listrik.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses partial discharge tersebut. Di antaranya adalah akibat polusi, kerusakan bahan akibat getaran, telah mendekati masa ketahanannya dan lain lain. Hal ini sejalan dengan penjelasan [4]. Ia mengemukakan bahwa Karakteristik isolasi akan memburuk seiring waktu karena berbagai faktor seperti operasi jangka panjang, jarak *ground* yang tidak mencukupi, jarak *clearance* yang tidak memadai, kontak yang buruk, atau kualitas lingkungan yang buruk untuk *insulation aging*. Walaupun demikian pengukuran dan interpretasi partial discharge (PD) telah menjadi alat yang digunakan untuk memantau kondisi dan risiko kegagalan isolasi peralatan listrik tegangan tinggi [5].

## 2. METODE

PD diklasifikasi menjadi dua bagian yaitu PD Eksternal Discharge dan Internal Discharge. Perbedaan dari kedua bagian tersebut adalah terletak pada terjadinya PD terhadap objek itu sendiri. Untuk PD Eksternal, terjadi di luar peralatan listrik. Kasus PD seperti ini terjadi pada saluran udara, pada armature dll. Sedangkan untuk PD Internal terjadi di dalam suatu sistem. Sistem pengukuran PD memberikan informasi tentang sifat-sifat penggunaan bahan isolasi pada peralatan daya tinggi.

Adapun Jenis PD dibagi dalam 3 Jenis yaitu, Corona Discharge, Corona Discharge, dan Cavity Discharge. Masing masing dari 3 jenis ini memiliki karakteristik PD yang berbeda beda. Corona Discharge merupakan PD yang terjadi di sekitar konduktor pada ruang bebas. Discharge korona diakibatkan oleh medan yang tidak seragam pada ujung yang tajam dari konduktor yang mengalami tegangan tinggi. Insulasi berupa udara, gas atau cairan. Fenomena ini di tunjukan oleh gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Corona discharge

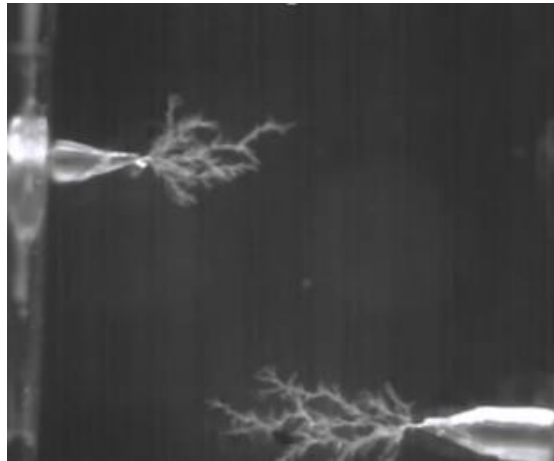
Surface Discharge permukaan terjadi pada interface bahan dielektrik seperti interface gas / padat yang mengalami tekanan berlebih. Ketika permukaan suatu isolasi tidak mampu menahan beban muatan, maka akan terjadi peristiwa PD yang terletak pada sisi atau permukaan dari suatu isolasi. Fenomena ini ditunjukkan oleh gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Surface discharge

Cavity Discharge atau Rongga umumnya terbentuk dalam bahan isolasi padat atau cair. Rongga umumnya diisi dengan gas atau udara. Ketika gas di rongga terlalu stres, Discharge akan terjadi. Pada insulasi berupa minyak, cavity discharge ini ditandai dengan adanya gelembung udara yang diakibatkan oleh reaksi gas kimi yang ada didalamnya. Gelembung udara tersebut dianggap sebagai rongga atau cavity yang dapat mempermudah proses discharge pada insulasi cair.

Pada bahan insulasi padat, rongga biasanya terbentuk akibat bahan yang tidak rata dan memiliki rongga rongga ketika proses pembuatannya. Selain itu, rongga rongga tersebut bisa diakibatkan oleh getaran atau gesekan bahan yang menyebabkan struktur didalamnya rusak hingga menimbulkan rongga rongga kecil maupun besar. Akibat adanya rongga ini, PD dapat terjadi bahkan dapat menembus insulasi keseluruhan hingga terjadi flas over. Fenomena ini ditunjukkan oleh gambar 3 berikut ini.

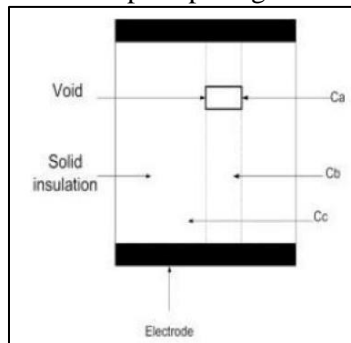


Gambar 3. Cavity discharge

### 3. HASIL

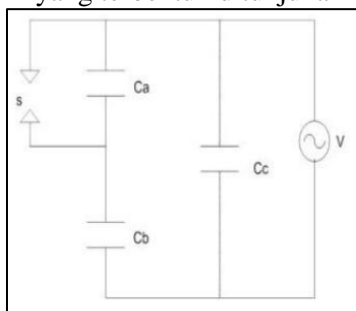
#### 3.1 Mode Fisis

[6] Memodelkan PD dengan skema seperti pada gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Model Fisis PD [7]

Patel juga memberikan informasi mengenai model rangkaian listrik dari hasil pemodelan PD tersebut. Adapun rangkaian listrik PD yang terbentuk ditunjukkan oleh gambar 5 berikut ini.

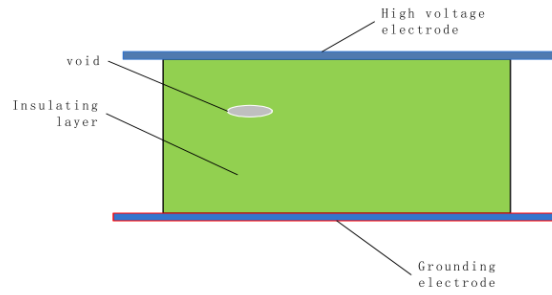


Gambar 5. Model Rangkaian Listrik PD [7]

Dari Gambar 5 tersebut diperoleh keterangan berikut ini:

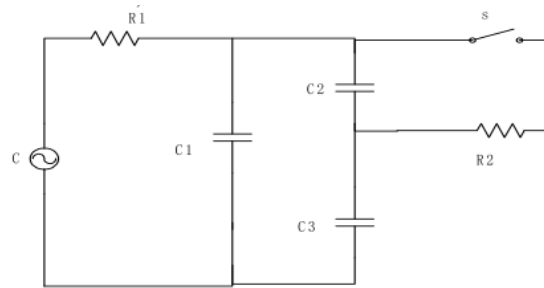
- V = applied voltage at power frequency
- S = Spark gap representing discharge of Ca
- Ca = Capacitor representing the cavity
- Cb = Capacitor representing insulating material around cavity
- Cc = Capacitance of the remaining insulating material.

[8] Memodelkan PD yang hampir sama dengan yang dilakukan oleh [6]. Adapun model PD yang dikemukakan oleh [8] adalah sebagai berikut.



Gambar 6. Model Fisis PD ([8])

[8] Juga menambahkan bahwa Ketika material diisolasi dengan baik, tegangan antara pelat elektroda atas dan bawah merata di lapisan insulasi menengah. Namun ketika lapisan isolasi memiliki void yang kecil, karena permitivitas dielektrik dan udara berbeda, yang mana Permittivitas bahan isolasi umumnya jauh lebih besar daripada dielektrik udara, konstanta dielektrik dan berbanding terbalik dengan distribusi tegangan, maka isolasi tersebut cenderung rusak. [8] Memodelkan rangkaian listrik dari PD sebagai berikut.



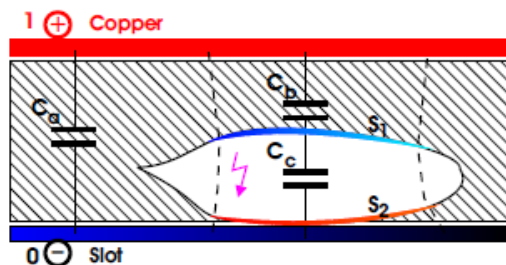
R1 represents resistance of the line  
R2 represents the resistance of the void after the breakdown

Gambar 7. Model rangkaian listrik PD [8]

Secara Matematis, rangkaian tersebut bisa dirumuskan sebagai berikut.

$$u_2 = \frac{C_3}{C_3 + C_2} u_m \dots\dots\dots (1)$$

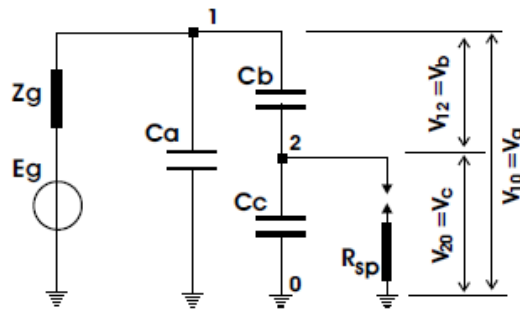
[9] menawarkan model yang sedikit agak berbeda. Model tersebut digambarkan oleh gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Model fisis PD [9]

[10] juga memberikan informasi mengenai model rangkaian listrik dari pemodelan PD. Adapun rangkaian listrik PD yang terbentuk ditunjukkan oleh gambar 9 berikut ini.





Gambar 9. Model Rangkaian Listrik PD [10]

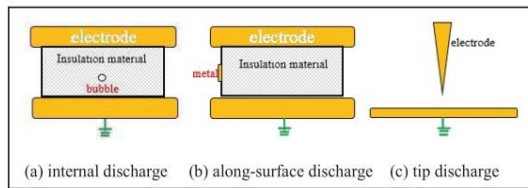
Secara Matematis [10] Memberikan model matematisnya sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 V_a(t) &= V_{10}(t) = V_{am} \sin(\omega t) \\
 V_b(t) &= V_{12}(t) = \frac{C_c}{C_b + C_c} V_{am} \sin(\omega t) \\
 V_c(t) &= V_{20}(t) = \frac{C_b}{C_b + C_c} V_{am} \sin(\omega t); \quad V_c < U_p
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots (2)$$

Dari sejumlah pemodelan PD menurut para ahli, void selalu di representasikan sebagai kapasitansi. Hal ini sejalan dengan [11] yang menyatakan bahwa representasi jaringan kapasitif dari void dalam kabel daya listrik telah digunakan untuk studi transien yang disebabkan oleh gangguan pada ruang tertutup.

### 3.2 Simulasi Partial Discharge

Model khas untuk mendapatkan nilai partial discharge untuk peralatan listrik bertegangan tinggi adalah internal discharge, surface discharge, dan tip discharge. Tip discharge biasanya terjadi pada sambungan logam tempat peralatan terhubung karena permukaan logam tidak rata. Surface discharge disebabkan oleh debu pada permukaan dan kelembaban. Jenis partial discharge yang disebutkan di atas dapat atasi dengan pemeliharaan rutin secara offline. Alasan terjadinya internal discharge disebabkan oleh operasi jangka panjang atau getaran. Berikut ini akan memperkenalkan simulasi pola discharge dan dapat diterapkan sebagai referensi untuk diagnosis partial discharge [4].



Gambar 10. Pola Discharge untuk mengukur PD

### 3.3 Temuan dan Bahasan

Salah satu Fenomena dalam partial discharge adalah Electrical treeing. Treeing listrik adalah salah satu fenomena populer untuk isolasi listrik nanocomposite padat [12]. Dalam dielektrik padat, istilah ‘electrical treeing’ digunakan untuk menggambarkan sebagai kerusakan fisik suatu bahan, berongga dan saling berhubungan satu sama lain serta muncul akibat tekanan listrik yang tinggi [13]. Oleh sebab itu, [14] menyebutkan bahwa electrical treeing ini sebagai mekanisme paling signifikan dalam kerusakan dielektrik bahan polimer. Hal tersebut sejalan dengan [15] bahwa electrical treeing dianggap sebagai penyebab utama gangguan listrik pada sistem isolasi polimer padat bertegangan tinggi (HV). Chen juga menjelaskan secara lengkap bahwa Fenomena treeing biasanya terlihat di bawah medan listrik yang tinggi, hal itu juga sering dikaitkan dengan aktivitas pelepasan parsial (PD), yang dianggap sebagai kekuatan pendorong yang merusak bahan polimer. [16] dalam



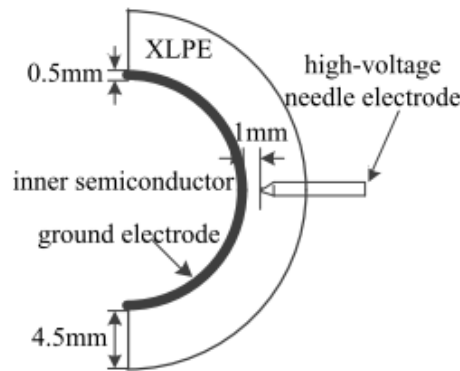
penelitiannya yang berjudul “Simulation of Electrical Trees in XLPE Cable Insulation and Electric Field Analysis” mencoba menganalisis mengenai peristiwa electrical treeing tersebut. Adapun spesifikasi dalam kabel tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Spesifikasi material kabel

Property	Cable
Type	YJV22
Insulation Material	XLPE
Conductor Size, mm <sup>2</sup>	3*240
Rated Voltage, kV	10
Insulation Thickness, mm	4.5

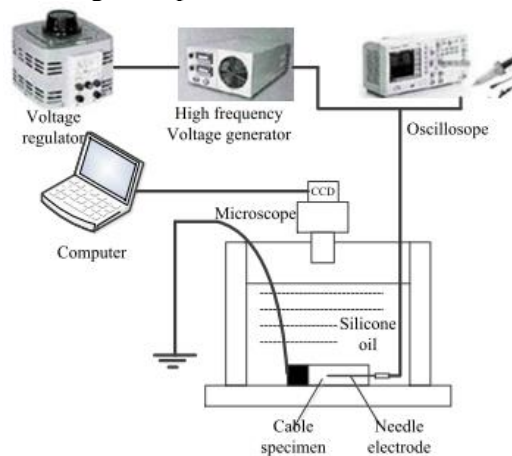
Langkah langkah untuk mendapatkan hasil penelitian mengenai electrical treeing ini adalah.

(1) Melepaskan lapisan pelindung logam dari XLPE. Sementara itu, konduktor ditarik keluar dan lapisan semikonduktor dalam dipertahankan. (2) Memotong insulasi kabel ke dalam spesimen setengah lingkaran berongga dengan ketebalan 3 mm. Untuk mengamati pertumbuhan electrical treeing dengan jelas di bawah mikroskop, amplas digunakan untuk memoles spesimen agar tetap rata. (3) Memasukkan elektroda jarum (jari-jari kelengkungan adalah  $10 \pm 1 \mu\text{m}$ ) ke dalam spesimen sebagai elektroda tegangan tinggi. Elektroda ground adalah semikonduktor dalam. Jarak antara elektroda tegangan tinggi dan ground adalah 1 mm. Untuk lebih jelasnya silahkan simak gambar 11 berikut ini.



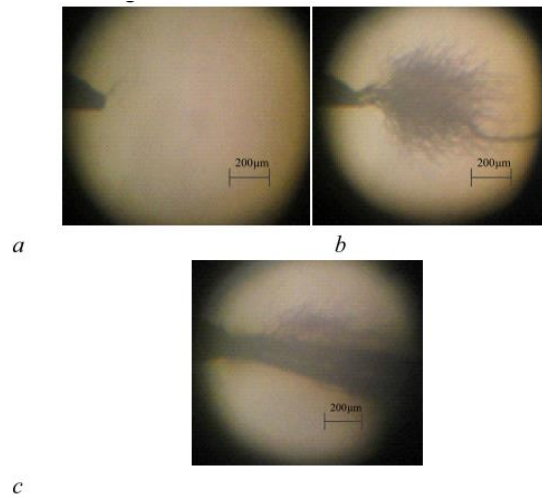
Gambar 11. Penggunaan Kabel XLPE

Untuk skema rangkaian percobaan, di ilustrasikan oleh gambar berikut ini.



Gambar 12. Skema pemasangan XLPE untuk diamati

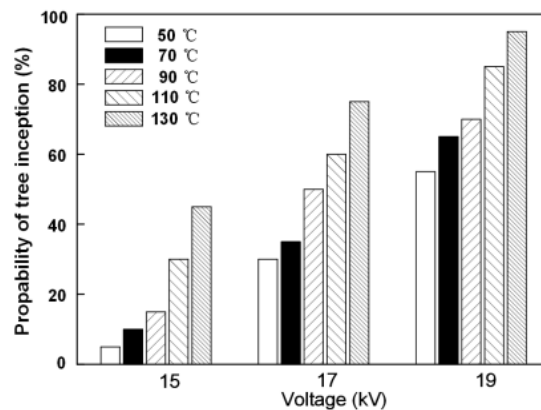
Hasil dari percobaan yang dilakukan ditunjukkan oleh gambar 13 berikut ini.



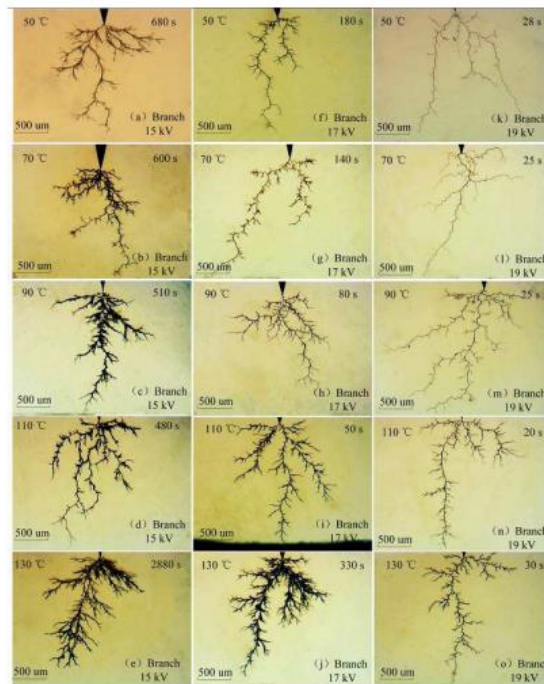
Gambar 13. Hasil percobaan a) inisiasi treeing. b) Tumbuh cabang treeing. c) breakdown

Dari percobaan tersebut diperoleh kesimpulan Kekuatan medan listrik maksimum dekat ujung elektroda lebih tinggi daripada kekuatan polietilen dan electrical treeing secara bertahap diproduksi di dekat ujung jarum. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kekuatan medan listrik di ujung treeing menurun dengan meningkatnya jumlah cabang. Pelindung medan listrik yang dibentuk oleh ujung electrical treeing dapat mengurangi kekuatan medan listrik di ujung tree dan dapat menghasilkan pembentukan electrical treeing yang tidak rusak.

Fenomena menarik ditemukan oleh [17] yang ia tulis dalam karya ilmiahnya yang berjudul “*Effect of Ambient Temperature on Electrical Treeing and Breakdown Phenomenon of Polypropylene with Repetitive Pulse Voltage*”. Pada penelitiannya tersebut didapatkan hasil bahwa electrical treeing ternyata dipengaruhi juga oleh suhu. Perbedaan suhu mengakibatkan perbedaan insepasi dari peristiwa electrical treeing. Adapun hasilnya dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut ini.



Gambar 14. Presentasi insepasi treeing terhadap tegangan yang dipengaruhi suhu



Gambar 15. Morfologi khas electrical treeing dalam kondisi yang berbeda.

Simpulan yang diperoleh dari percobaan tersebut adalah: (1) Morfologi electrical treeing dan probabilitas awal tergantung pada suhu tinggi dan amplitudo pulsa. Dengan meningkatnya suhu dan amplitudo, kepadatan tree dan probabilitas inisiasi meningkat. (2) Suhu tinggi dan amplitudo pulsa memiliki efek besar pada proses pertumbuhan tree. Laju pertumbuhan tree meningkat dengan meningkatnya suhu dari 50 hingga 110 ° C. Meskipun lebih kecil pada 130 ° C dari pada 110 ° C. Laju pertumbuhan pohon dan dimensi fraktal meningkat, dengan meningkatnya amplitudo pulsa pada suhu tinggi yang sama.

#### 4. KESIMPULAN

Dari pembahasan mengenai Model Fisis, Model Matematis, Model Rangkaian Listrik Fenomena Partial Discharge ini dapat ditarik sejumlah kesimpulan yaitu pemodel fisis PD diantara para ahli berbeda beda, namun memiliki persamaan dalam pemodelan matematis dan merepresentasikan void sebagai kapasitansi. Fenomena Electrical treeing diakibatkan oleh tekanan listrik pada suatu bahan padat yang pada waktu tertentu menyebabkan breakdown. Kegagalan isolasi dapat disebabkan oleh getaran atau proses pabrikan sehingga menyebabkan void dalam bahan isolasi. Insepsi electrical treeing dapat dipengaruhi oleh suhu. Semakin besar suhu, probabilitas insepsi electrical treeing semakin besar.

#### REFERENSI

- [1] M. Au and B. L. Agba, "A Model of Electromagnetic Interferences Induced by Corona Discharges for Wireless Channels in Substation Environments," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 57, no. 3, pp. 522–532, 2015.
- [2] K. Firuzi, M. Vakilian, B. T. Phung, and T. R. Blackburn, "Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features," *IEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8977, no. c, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2872820.
- [3] U. Khayam, "Design , Implem entation , and Testing of Partial Discharge Signal Pattern Recognition an nd Judgment System Applic ation Using Statistical I Method," pp. 314–318, 2015.
- [4] C. J. Chou and C. H. Chen, "Measurement and analysis of partial discharge of high and medium voltage power equipment," *Proc. - 2018 7th Int. Symp. Next-Generation Electron. ISNE 2018*, no. Isne, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/ISNE.2018.8394749.
- [5] M. Zhu, J. Zhang, Y. Li, Y. Wei, J. Xue, and J. Deng, "Partial Discharge Signals Separation



- Using Cumulative Energy Function and Mathematical Morphology Gradient,” *IEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 1, pp. 482–493, 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.005481.
- [6] D. S. Patel and J. A. Patel, “Simulation and Mathematical Analysis of Partial Discharge Measurement in Transformer,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 585–592, 2015.
- [7] U. D. Patel, J. A. Patel, and H. R. Patel, “Simulation and Mathematical Analysis of Partial Discharge Measurement in Transformer,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 585–592, 2015.
- [8] M. Li and Z. Qinghui, “Study on Simulation Model on Partial Discharge in Void of Solid Insulation,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 986–987, pp. 2014–2018, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.986-987.2014.
- [9] N. Kartalovic, D. Kovacevic, and S. Milosavljevic, “An advanced model of partial discharge in electrical insulation,” *Facta Univ. - Ser. Electron. Energ.*, vol. 24, no. 1, pp. 41–55, 2011, doi: 10.2298/fuee1101041k.
- [10] N. Kartalovic, D. Kovacevic, and S. Milosavljevic, “An advanced model of partial discharge in electrical insulation,” *Facta Univ.*, vol. 24, no. 1, pp. 41–55, 2011, doi: 10.2298/fuee1101041k.
- [11] Z. Achillides, M. G. Danikas, and E. Kyriakides, “Partial Discharge Modeling and Induced Charge Concept: Comments and Criticism of Pedersen’s Model and Associated Measured Transients,” *IEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 2, pp. 1118–1122, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006013.
- [12] D. R. Cornish and C. Nyamupangedengu, “Time-evolution phenomena of electrical tree partial discharges in 5 %wt MgO, Alumina and Silica Epoxy nanocomposites,” *2014 IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP 2014*, pp. 43–46, 2014, doi: 10.1109/CEIDP.2014.6995761.
- [13] H. Zheng and S. M. Rowland, “Electrical treeing in a glassy epoxy resin - The filamentary tree and the PD tree,” *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, vol. 2017-Octob, pp. 765–768, 2018, doi: 10.1109/CEIDP.2017.8257517.
- [14] R. Zhang, X. Liu, T. Zhang, C. Xue, H. Chen, and Y. Li, “Electrical tree propagation in composite insulation for wind turbine generator under repetitive impulse voltage,” *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, vol. 2016-Decem, pp. 1007–1010, 2016, doi: 10.1109/CEIDP.2016.7785631.
- [15] S. Chen, Z. Lv, S. M. Rowland, J. Carr, and P. J. Wiithers, “Three Dimensional Imaging of Electrical Trees in Multiple Stages,” *IEE*, pp. 425–428, 2017.
- [16] G. Ye, C. Cai, B. Zhou, and M. Ye, “Simulation of electrical trees in XLPE cable insulation and electric field analysis,” *J. Eng.*, vol. 2019, no. 16, pp. 1882–1885, 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8704.
- [17] B. X. Du, L. W. Zhu, and T. Han, “Effect of ambient temperature on electrical treeing and breakdown phenomenon of polypropylene with repetitive pulse voltage,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 4, pp. 2216–2224, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006229.