



In-depth Study of Partial Discharge in Power Transformers: Challenges and Analysis Selected Articles

Studi Mendalam tentang Partial Discharge pada Transformator Daya: Tantangan dan Analisis Artikel Terpilih

Keenan Pirsi Alkautsar^{1*}, Azis Kurnia², Rizqy Rahmad Maulana³

^{1,2,3}Teknik Elektro, UIN Sultan Syarif Kasim Riau, Indonesia

Corresponden E-Mail: ¹keenanpirsi22@gmail.com, ²aziskurnia695@gmail.com, ³rizqyrahmad26@gmail.com

Makalah: Diterima 20 Juni 2024; Diperbaiki 07 August 2024; Disetujui 13 August 2024
Corresponding Author: Keenan Pirsi Alkautsar

Abstrak

Partial discharge (PD) adalah fenomena listrik yang terjadi dalam isolasi transformator daya ketika tegangan tinggi menyebabkan pelepasan energi listrik dalam jumlah kecil. Meskipun PD sendiri tidak langsung menyebabkan kerusakan, fenomena ini dapat secara bertahap merusak isolasi, mengurangi efektivitasnya, dan akhirnya menyebabkan kegagalan transformator jika tidak terdeteksi dan ditangani. PD biasanya mengindikasikan adanya kelemahan atau cacat dalam sistem isolasi, seperti celah udara, kontaminasi, atau kerusakan material isolasi. Artikel ini mengulas penelitian terbaru mengenai PD pada transformator daya yang diterbitkan sejak tahun 2020 dan memilih beberapa studi yang dominan untuk dianalisis lebih mendalam. Artikel ini mengidentifikasi tantangan dalam deteksi dan analisis PD, seperti sensitivitas sensor, interferensi sinyal, dan kebutuhan akan metode diagnosis yang lebih akurat.

Keyword: Deteksi, Metode, Partial Discharge, Sensor, Transformator Daya.

Abstract

Partial discharge (PD) is an electrical phenomenon that occurs in the insulation of a power transformer when high voltage causes the release of small amounts of electrical energy. Although PD itself does not directly cause damage, this phenomenon can gradually damage the insulation, reduce its effectiveness, and eventually lead to transformer failure if not detected and addressed. PD usually indicates a weakness or defect in the insulation system, such as an air gap, contamination, or damage to the insulation material. This article reviews recent research on PD in power transformers published since 2020 and selects some dominant studies for further analysis. The article identifies challenges in PD detection and analysis, such as sensor sensitivity, signal interference, and the need for more accurate diagnosis methods.

Keyword: Detection, Methods, Partial Discharge, Sensors, Power Transformers.

1. Pendahuluan

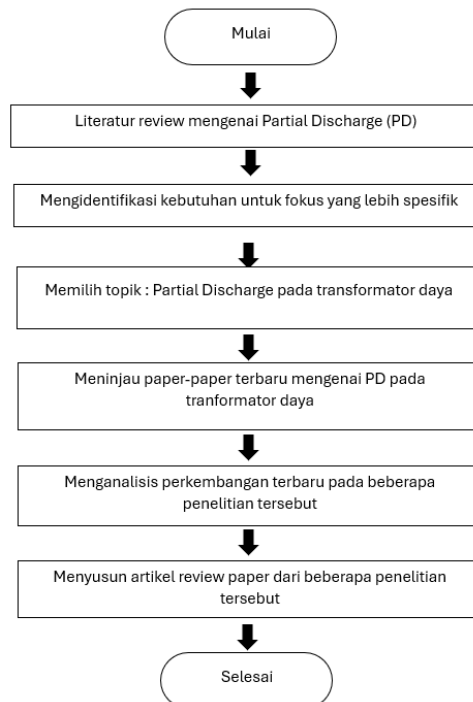
Partial discharge (PD) merupakan fenomena adanya pelepasan muatan arus listrik kecil yang terjadi pada isolasi atau di sekitar permukaan isolasi dalam sebuah sistem listrik [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Selama masa pakainya, transformator terpengaruh oleh berbagai tekanan seperti kimia, listrik, termal, mekanikal, dan elektromagnetik baik dalam kondisi beban normal maupun abnormal. Isolasi transformator akan mengalami degradasi bertahap tergantung pada durasi dan besaran tegangan lebih yang dapat menyebabkan panas berlebihan pada inti transformator dan membebani isolasi [2], [7], [8]. Untuk mencegah partial discharge (PD) berkembang menjadi masalah yang lebih serius dan menyebabkan kegagalan transformator, yang berdampak pada sistem distribusi listrik ke beban, diperlukan tindakan awal yang tepat yakni deteksi dini.

Maka daripada itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk meninjau literatur dari berbagai studi yang diterbitkan sejak tahun 2020 guna mengidentifikasi metode-metode yang digunakan untuk deteksi dini, teknik

pemantauan, serta algoritma dan teknik analisis data partial discharge dalam isolasi pada transformator daya. Penelitian ini berfokus pada menggali informasi tentang berbagai teknik deteksi, pemantauan, serta algoritma dan teknik analisis data yang digunakan untuk mengidentifikasi partial discharge.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini dilakukan dengan meninjau beberapa penelitian dengan topik utama partial discharge (PD). Setelah mengumpulkan literatur yang relevan, dilakukan tinjauan dan menganalisis penelitian-penelitian tersebut untuk mengerucutkan fokus pada partial discharge yang terjadi pada transformator daya. Selanjutnya, dilakukan identifikasi mendalam berbagai perkembangan dalam penelitian yang menangani partial discharge pada transformator daya, termasuk metode deteksi, teknik analisis, dan teknologi pemantauan yang digunakan. Artikel ini mengambil beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti untuk dianalisis lebih mendalam mengenai partial discharge yang ada pada transformator daya.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

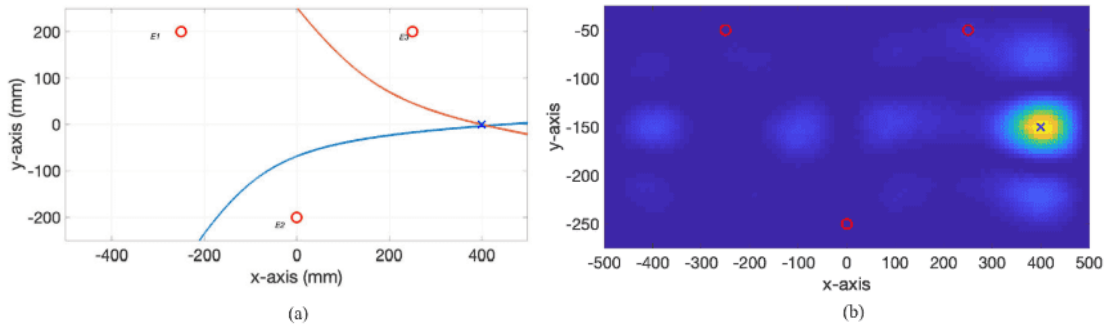
3.1 Penggunaan Metode TdoA dan EMTR dengan Menggunakan Sensor UHF sebagai Pendeteksi

Judul penelitian yang pertama dianalisis adalah "Partial Discharge Localization Using Electromagnetic Time Reversal: A Performance Analysis." Penelitian ini dilakukan oleh Mohammad Azadifar et al., yang mencakup peneliti dari beberapa institusi, yaitu Hamidreza Karami, Zhaoyang Wang, Marcos Rubinstein, Farhad Rachidi, Hossein Karami, Ali Ghasemi, dan Gevork B. Gharehpetian [1]. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan metode Electromagnetic Time Reversal (EMTR) dan Time Difference of Arrival (TDoA) dalam melokalisasi partial discharge (PD) pada transformator daya, dengan fokus pada akurasi dan faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja masing-masing metode. Metode TDoA menggunakan perbedaan waktu kedatangan sinyal elektromagnetik ke beberapa sensor untuk menentukan lokasi PD, membutuhkan minimal dua sensor. Sementara itu, metode EMTR melibatkan rekaman medan listrik atau magnet oleh beberapa sensor, pembalikan waktu sinyal, dan analisis distribusi medan listrik yang dihasilkan untuk menemukan lokasi PD berdasarkan intensitas medan listrik.

Pengujian pertama yang dilakukan adalah memodelkan tanpa belitan. Tangki transformator dimodelkan dengan ukuran 1000 x 500 mm. Empat titik sensor (E1, E2, E3, dan E4) ditempatkan pada posisi yang telah ditentukan seperti yang tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Koordinat Lokasi Penempatan Sensor terhadap Sumbu x dan y (x,y) [1]

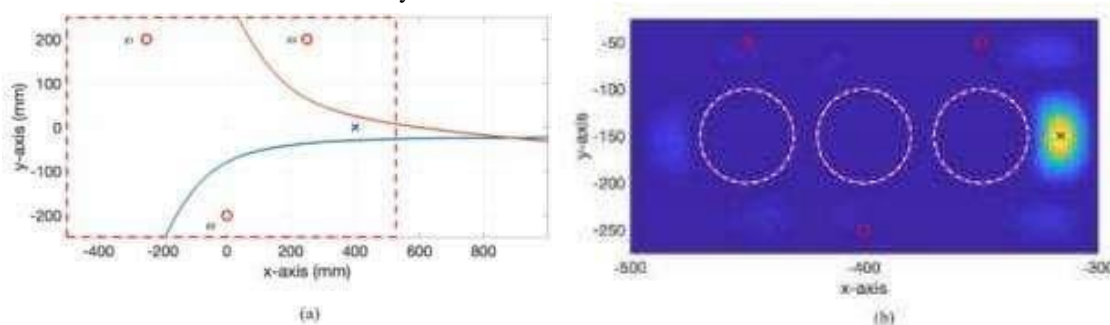
| Sensor | Location Coordinates (m) |
|--------|--------------------------|
| E1 | (-250, 200) |
| E2 | (0, -200) |
| E3 | (250, 200) |
| E4 | (-450, 0) |



Gambar 1. Pengujian Pertama tanpa Belitan Lokalisasi Sumber PD (a) TdoA (b) EMTR [1]

Pada Gambar 1 (a), kurva hiperbolik antara sensor 2 dan 3 ditunjukkan dalam warna merah, sementara kurva hiperbolik antara sensor 1 dan 2 ditunjukkan dalam warna biru. Pada Gambar 1 (b), lokasi sensor ditunjukkan dengan lingkaran merah, sedangkan lokasi perkiraan sumber PD ditunjukkan dengan tanda silang.

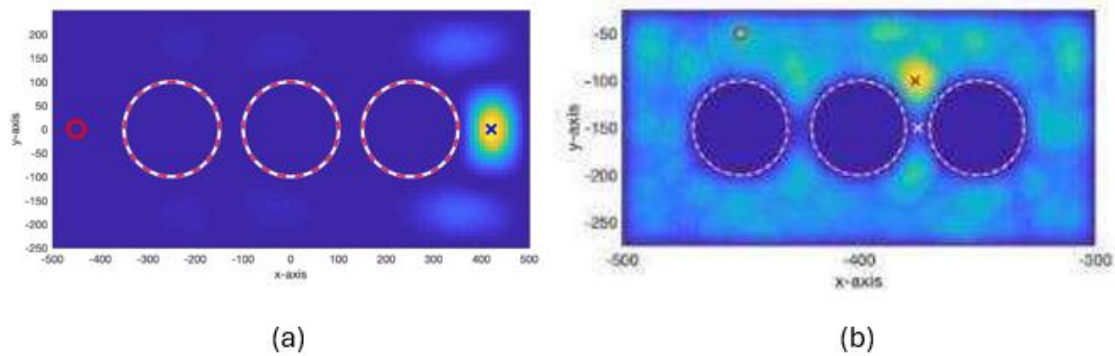
Hasil pengujian bahwa metode Electromagnetic Time Reversal (EMTR) lebih unggul dalam lokalisasi sumber Partial Discharge (PD) dibandingkan metode Time Difference of Arrival (TDoA). EMTR menggunakan distribusi intensitas daya medan listrik maksimum yang dinormalisasi untuk menentukan lokasi perkiraan sumber PD, memberikan kesalahan lokasi kurang dari satu sel grid. Di sisi lain, TDoA mengalami kesalahan lokasi sekitar 11 mm dari titik sebenarnya sumber PD.



Gambar 2. Pengujian Kedua Adanya Belitan Lokalisasi Sumber PD (a) TdoA (b) EMTR. Pada Gambar 2 (b) Menunjukkan Garis Lingkaran Putus-Putus Menunjukkan adanya Belitan [1]

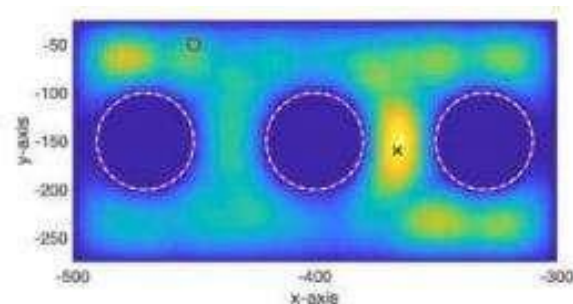
Dilakukan pengujian kedua dengan adanya belitan. Hasil pengujiannya bahwa metode Electromagnetic Time Reversal (EMTR) lebih efektif dalam lokalisasi sumber Partial Discharge (PD) pada transformator daya yang dilengkapi dengan model belitan, dibandingkan dengan metode Time Difference of Arrival (TDoA). EMTR mampu memberikan hasil yang lebih akurat dan konsisten, tidak terpengaruh oleh pantulan gelombang elektromagnetik dari dinding transformator dan belitan. Di sisi lain, TDoA mengalami kegagalan dalam menentukan lokasi sumber PD, dengan kesalahan lokalisasi mencapai 489 mm. Dalam konteks pengujian ini, EMTR merupakan pilihan yang lebih baik untuk aplikasi pengukuran PD pada transformator daya dengan kondisi yang kompleks seperti adanya belitan.

Dilakukan pengujian ketiga hanya menggunakan satu sensor saja dengan metode EMTR. Metode TdoA tidak dilibatkan karena metode ini melibatkan minimal dua sensor. Penempatan sensor dilakukan garis pandangnya secara tidak langsung dari lokasi sumber PD seperti Gambar 3 (a). Pada pengujian keempat yakni bagaimana teknik EMTR digunakan untuk mengidentifikasi lokasi PD di antara dua gulungan fase yang berdekatan pada transformator. Posisi sumber Partial Discharge (PD) ditempatkan agak jauh dari sensor, dan sumber PD itu sendiri diletakkan dekat dengan permukaan konduktif. Lokasi ini dianggap lokasi yang kritis. Dilakukan pemodelan awal dengan jarak antar gulungan fase dibuat 50 mm. Kemudian, baru dimodelkan dengan jarak antar gulungan 150 mm.



Gambar 3. Pengujian Satu Sensor dengan Metode EMTR (a) Uji Ketiga (b) Uji Keempat [1]

Hasil pengujian dengan metode Electromagnetic Time Reversal (EMTR) efektif dalam lokalisasi sumber Partial Discharge (PD) menggunakan satu sensor, meskipun posisi sensornya dipilih sedemikian rupa sehingga tidak ada garis pandang langsung antara sensor dan sumber PD melalui ketiga belitan transformator.



Gambar 4. Pengujian Keempat Lokasi PD Posisinya di antara Gulungan dengan Jarak antar Gulungan 150 mm [1]

Berdasarkan Gambar 3 (b) dan 4 bahwa hasil pengujian dengan menggunakan metode EMTR berturut-turut menunjukkan kesalahan lokalisasi sumber PD sekitar 112 mm dari titik lokasi PD yang sebenarnya dengan jarak belitan 50 mm. Sementara, ketika jarak antar gulungan dibuat 150 mm, hasil kesalahan lokalisasi berkurang menjadi 21 mm titik lokasi PD sebenarnya. Pada saat jarak yang dekat antara sumber Partial Discharge (PD) dan permukaan konduktif gulungan transformator (konfigurasi pertama sebesar 25 mm) mengakibatkan gangguan pada pola radiasi gelombang elektromagnetik, yang menyebabkan kesalahan lokalisasi dalam teknik EMTR sekitar 112 mm. Pada jarak yang lebih jauh dari permukaan konduktif (konfigurasi kedua sebesar 75 mm), gangguan ini berkurang dan memberikan hasil lokalisasi sumber PD yang lebih akurat, dengan kesalahan lokalisasi sekitar 21 mm. Oleh karena itu, pemilihan jarak yang tepat sangat penting dalam meningkatkan akurasi dan efektivitas teknik EMTR untuk pemantauan transformator.

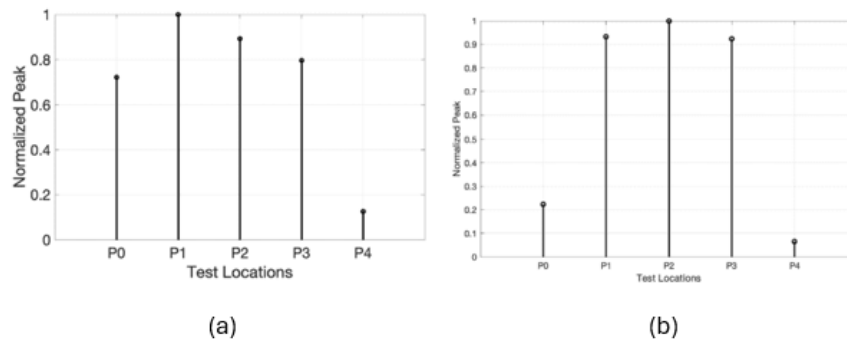
Penelitian ini juga melakukan eksperimen untuk memvalidasi teknik EMTR (Electromagnetic Time Reversal) menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) HP-8753D dalam domain frekuensi. Eksperimen dilakukan seperti Gambar 5 yakni dibuat sebuah kotak logam berdimensi $101 \times 73 \times 73$ cm³ yang merepresentasikan tangki transformator. Antena monopole dengan panjang 5.3 mm digunakan sebagai sumber Partial Discharge (PD), sedangkan antena monopole yang lainnya dengan panjang 8.3 mm digunakan sebagai sensor untuk mendeteksi sinyal PD yang dipancarkan.



Gambar 5. Eksperimen yang Dilakukan untuk Memvalidasi Metode EMTR [1]

Pengukuran dilakukan pada beberapa titik uji di sekitar kotak logam, dengan jarak antara titik uji dan objek logam bervariasi dari 1,5 cm hingga 5,5 cm. Jarak 1,5 cm ini setara dengan sekitar $1/7$ dari panjang gelombang terpendek sumber, yang mempengaruhi pola radiasi gelombang elektromagnetik yang diterima oleh sensor. Namun, eksperimen ini memiliki beberapa batasan yang perlu diperhatikan. Pertama, pengukuran dilakukan hanya pada beberapa titik uji karena keterbatasan dalam melakukan pengukuran di semua lokasi yang ada dalam ruang tersebut. Kedua, efek kedekatan dengan objek logam dieksplorasi dengan mengambil titik uji yang berjarak 1,5 cm hingga 5,5 cm dari objek logam, mempengaruhi pola radiasi gelombang elektromagnetik.

Hasil pengujiannya dengan mendekati sumber PD ke objek logam, metode ini menunjukkan bahwa medan puncak yang diukur pada titik uji lebih tinggi daripada lokasi sebenarnya dari sumber PD. Contohnya, pada Gambar 6 (a), medan puncak lebih tinggi di P1 daripada di P0, yang menyebabkan kesalahan lokalization sebesar 1 cm.



Gambar 6. Distribusi Normalisasi Peak Time-Reversed Field di Lokasi Uji (a) Sumber terletak di P0 (b) Sumber terletak di P2 [1]

Ketika sumber PD berada lebih jauh dari objek logam (3,5 cm dari objek), hasil menunjukkan pada Gambar 6 (b) bahwa medan puncak yang dinormalisasi tertinggi tepat berada di lokasi P2, yang merupakan lokasi sebenarnya dari sumber PD. Tidak ada kesalahan lokalization yang signifikan dalam pengaturan ini. Jadi, semakin jauh jarak dari objek logam, kesalahan lokalization berkurang. Pada jarak 3,5 cm dari objek logam, metode reversal waktu mampu mengidentifikasi lokasi sumber PD dengan akurat tanpa kesalahan lokalization yang berarti.

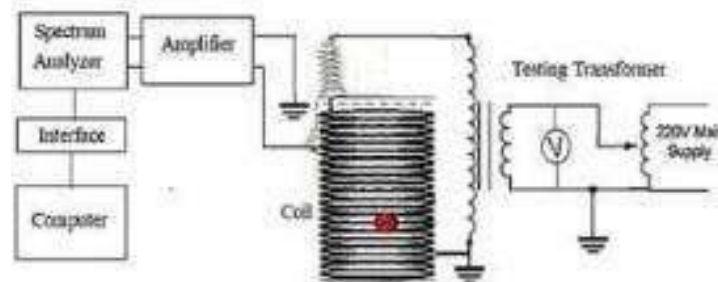
3.2 Penggunaan Signal-to-Noise Ratio (SNR) untuk Mengetahui Aktivitas Partial Discharge (PD)

Judul penelitian kedua adalah "Prognostication of Failures Using Signal-to-Noise Ratio to Determine Partial Discharges Activities in Power Transformers." Penelitian ini dilakukan oleh Muhammad Aslam et al., yang mencakup peneliti Muhammad Saad Rehan, Fahad R. Albogamy, Sadia Murawwat, Abdul Basit, dan Ghulam Hafeez [2]. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan teknik pemantauan real-time transformator tiga fasa dengan fokus pada deteksi cacat menggunakan Signal-to-Noise Ratio (SNR). Metode yang digunakan meliputi pemasangan sensor Ultra High Frequency (UHF) untuk memantau aktivitas partial discharge (PD) pada transformator daya, analisis data untuk menghitung SNR, dan pengujian transformator dalam berbagai kondisi operasional dengan transformator daya yang sudah mengalami kerusakan isolasi sebanyak tiga guna menguji respon sistem apakah sistem pemantauan berjalan dengan baik atau tidak. Pertama, gulungan transformator dibuat dari kawat tembaga berisolasi kertas Kraft yang dicelupkan dalam minyak dan ditempatkan di dalam tangki baja untuk pengujian pertama nantinya.



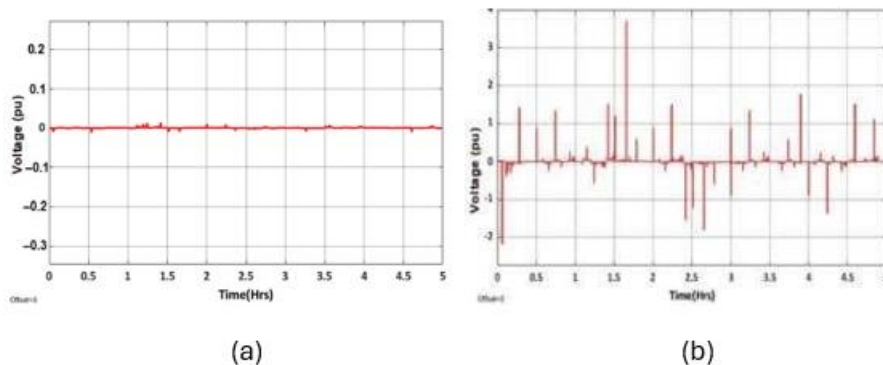
Gambar 7. Transformator HT Rakitan [2]

Sensor UHF tipe FOS4 dari Power Diagnostix Systems GmbH dipasang di lokasi dengan redaman minimal dan sensitivitas maksimal terhadap sinyal UHF, di mana sensor A ditempatkan di tengah perakitan gulungan dan sensor B di bagian atas tangki baja. Pengujian dilakukan dengan meningkatkan tegangan secara bertahap melalui autotransformer hingga terdeteksi aktivitas PD, dengan tegangan tidak melebihi 78kV untuk menjaga integritas gulungan. Hasil aktivitas PD direkam dan dianalisis selama periode 5 jam.



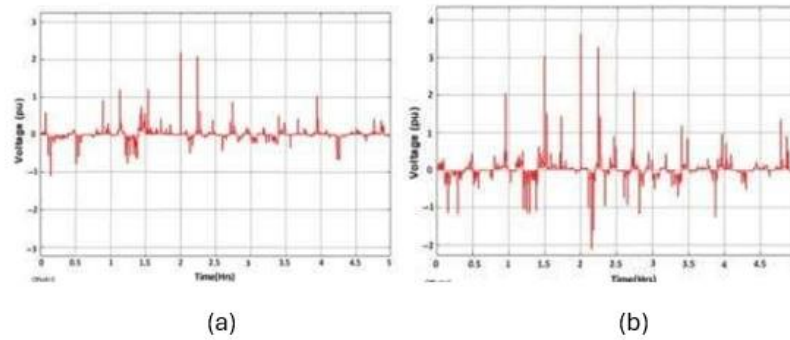
Gambar 8. Diagram Skematik untuk Pengujian [2]

Pengujian ini menunjukkan bahwa pada tegangan nominal, gulungan 1 tidak mengalami aktivitas PD yang signifikan. Berdasarkan Gambar 9, lonjakan noise yang terdeteksi dalam kisaran ± 1 volt dengan tegangan referensi 1 pu dan muatan kurang dari 0,1 pC, jauh di bawah ambang batas 5 pC yang diharapkan dalam aktivitas PD. SNR yang dihitung sebesar +40 dB mengindikasikan tidak adanya PD yang parah. Kesimpulannya bahwa kumparan atau gulungan 1 dalam kondisi baik dan tidak mengalami kerusakan isolasi yang signifikan. Berdasarkan Gambar 9 (b) bahwa hasil pengujian pada coil 2 menunjukkan aktivitas partial discharge (PD) yang melebihi batas yang diizinkan. Amplitudo pulsa akibat aktivitas PD berada dalam rentang +3.8 pu volt dan -2.3 pu volt, dengan muatan maksimum sekitar 10.6 pC. Parameter aktivitas PD yang diukur pada gulungan 2 adalah tegangan maksimum 15,80 kV, tegangan minimum 9,47 kV, frekuensi maksimum 1,5 GHz, frekuensi minimum 0,5 GHz, dan muatan 10,6 pC.



Gambar 9. Aktivitas PD (a) Kumparan 1 (b) Kumparan 2 [2]

Berdasarkan Gambar 10 (a) bahwa hasil pengujian pada gulungan 3 menunjukkan aktivitas Partial Discharge (PD) yang signifikan dengan lonjakan amplitudo PD mencapai sekitar +2,2 pu dan -1,15 pu, dimulai pada tegangan 11,7kV dan meningkat menjadi signifikan pada 16,7kV. Muatan maksimum yang terkait dengan lonjakan PD adalah sekitar 5,5 pC hingga 6 pC, menunjukkan aktivitas PD yang berbahaya. Hasil pengujian pada kumparan 4 dari transformator daya 132/11kV, 50MVA menunjukkan aktivitas Partial Discharge (PD) yang signifikan dan berbahaya. Pada tegangan 11,2kV, aktivitas PD dimulai dan meningkat hingga mencapai muatan sekitar 10pC pada tegangan 17,5kV. Amplitudo pulsa PD mencapai sekitar +3,7 pu dan -2,15 pu, menunjukkan adanya aktivitas PD yang berlebihan pada isolasi gulungan. Pengukuran Signal-to-Noise Ratio (SNR) menunjukkan nilai -11,36dB, yang mengindikasikan tingkat noise yang signifikan dan aktivitas PD yang berbahaya.

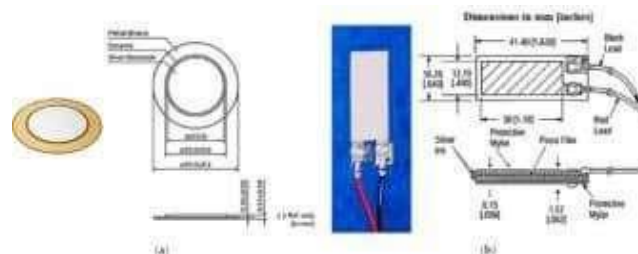


Gambar 10. Aktivitas PD (a) Kumparan 3 (b) Kumparan 4 [2]

Kesimpulannya, aktivitas PD bersifat acak dan intermitten, dipengaruhi oleh tekanan gas dalam kavitas isolasi. SNR menurun saat terjadi aktivitas PD dan menjadi negatif saat aktivitas PD berlebihan, menunjukkan korelasi antara tingkat aktivitas PD dan tingkat kerusakan isolasi. Penelitian ini menunjukkan pentingnya pemantauan real-time PD untuk mendeteksi cacat transformator daya dan mengurangi risiko kegagalan isolasi. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa Signal-to-Noise Ratio (SNR) merupakan parameter efektif untuk mendeteksi dan memantau aktivitas partial discharge (PD) pada transformator tiga fasa. Transformator dengan SNR di atas +24 dB menunjukkan tidak adanya cacat signifikan, sementara SNR di bawah +24 dB mengindikasikan aktivitas PD yang berpotensi merusak isolasi. SNR negatif mengidentifikasi kerusakan isolasi parah akibat PD berlebih. Dengan demikian, SNR menjadi alat penting dalam pemantauan real-time dan pencegahan kegagalan transformator.

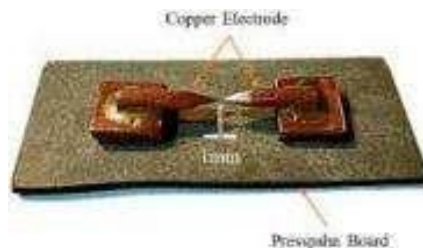
3.3 Deteksi dan Analisis Partial Discharge (PD) Menggunakan Sensor Akustik

Judul penelitian ketiga adalah "Detection and Analysis of Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers Using Low-Cost Acoustic Sensors." Penelitian ini dilakukan oleh Besharatifard et al., yang mencakup peneliti Saeed Hasanzadeh, Ehsan Heydariyan-Forushani, Hassan Haes Alhelou, dan Pierluigi Siano [9]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan sensor piezoelektrik berbiaya cukup terjangkau dalam mendeteksi dan memantau Partial Discharge (PD) pada transformator berisi minyak. Dua jenis sensor piezoelektrik yang digunakan, yaitu microfiber composite (MFC) LDT1-028K dan lead zirconate titanate (PZT), dievaluasi menggunakan analisis dalam domain waktu, frekuensi, dan waktu-frekuensi.



Gambar 11. Sensor Piezoelektrik (a) Lead Zirconate Titanate (PZT) (b) Microfiber Composite (MFC) LDT1-028K [9]

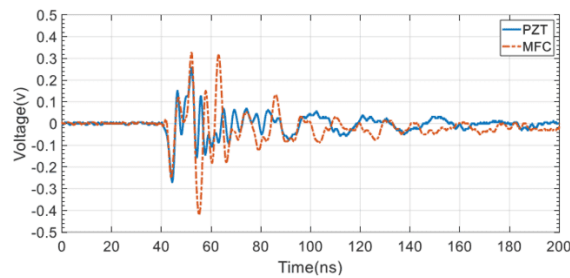
Sensor-sensor ini dipasang pada dinding transformator distribusi tiga fasa menggunakan gel lithium grease untuk menangkap sinyal Acoustic Emission (AE) yang dihasilkan oleh PD. Dua elektroda tembaga dipasang berhadapan dengan celah 1 mm untuk membentuk konfigurasi needle-needle sebagai sumber PD seperti Gambar 12.



Gambar 12. Elektroda Tembaga yang Digunakan untuk Menghasilkan Partial Discharge (sumber PD) [9]

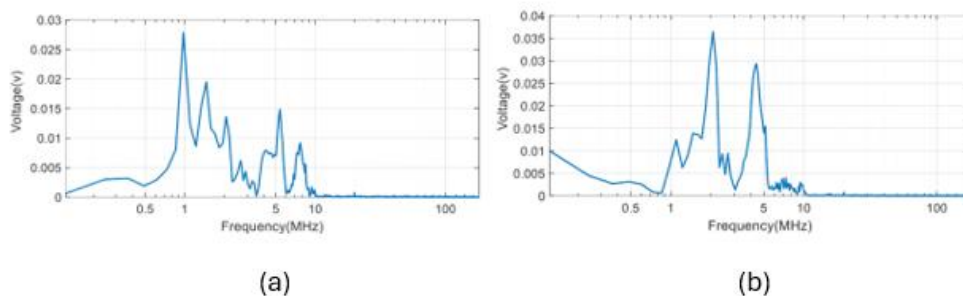
Sinyal akustik yang terdeteksi oleh sensor piezoelektrik dikirim ke osiloskop melalui kabel twisted pair untuk menghindari gangguan EMI dan noise lingkungan. Kabel twisted pair adalah jenis kabel yang terdiri dari dua

konduktor listrik yang dililitkan bersama untuk mengurangi interferensi elektromagnetik (EMI) dari lingkungan eksternal. Dari analisis domain waktu yang dilakukan, ditunjukkan pada Gambar 13, perbandingan respons sensor menunjukkan bahwa sensor MFC memiliki waktu naik yang lebih cepat dan durasi yang lebih pendek dibandingkan dengan sensor PZT untuk sinyal PD tertentu. Ini menunjukkan bahwa sensor MFC lebih baik dalam mendeteksi getaran cepat.



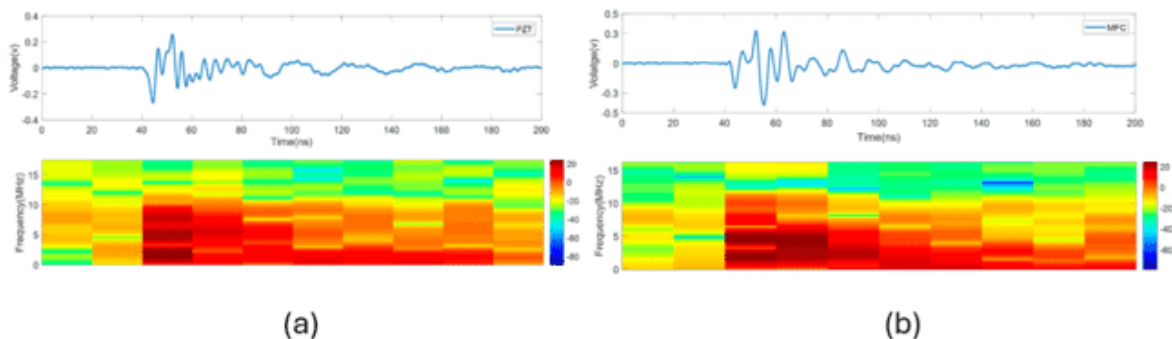
Gambar 13. Sinyal Partial Discharge dalam Domain Waktu yang Diperoleh dari Sensor AE [9]

Dalam analisis menggunakan Fast Fourier Transform (FFT), frekuensi dominan dari sinyal akustik yang dihasilkan oleh Partial Discharge (PD) berhasil diidentifikasi. Sensor PZT menunjukkan frekuensi dominan sekitar 1 MHz, sementara sensor MFC memiliki frekuensi dominan sekitar 2 MHz, seperti yang terlihat pada Gambar 14 (a) dan (b). Perbedaan dalam amplitudo FFT antara kedua sensor ini disebabkan oleh sensitivitas dan respons frekuensi masing-masing. Sensor PZT memiliki sensitivitas yang lebih tinggi untuk frekuensi di atas 5 MHz, sedangkan sensor MFC lebih responsif terhadap frekuensi di bawah 500 kHz.



Gambar 14. Sinyal Fast Fourier Transform pada Sensor (a) PZT (b) MFC [9]

Dengan menggunakan Short-Time Fourier Transform (STFT), analisis waktu-frekuensi secara jelas mengidentifikasi waktu terjadinya Partial Discharge (PD) dalam transformator berdasarkan spektrogram sinyal akustik. Pada spektrogram, waktu terjadinya kegagalan dapat dilihat dari perubahan tiba-tiba dalam amplitudo spektrum daya. Contohnya, dalam analisis yang disebutkan, terlihat bahwa peningkatan tiba-tiba dalam amplitudo spektrum daya terjadi sekitar 40 ns setelah waktu awal, menunjukkan adanya PD pada saat itu. STFT juga berhasil dalam karakterisasi frekuensi dominan dari sinyal PD, dengan sensor PZT menunjukkan frekuensi dominan sekitar 1 MHz dan sensor MFC sekitar 2 MHz.



Gambar 15. Spektrogram sinyal Akustik PD yang Ditangkap (a) Sensor PZT (b) Sensor MFC [9]

3.4 Karakteristik Penyebaran Sinyal Partial Discharge Frekuensi Tinggi pada Transformator

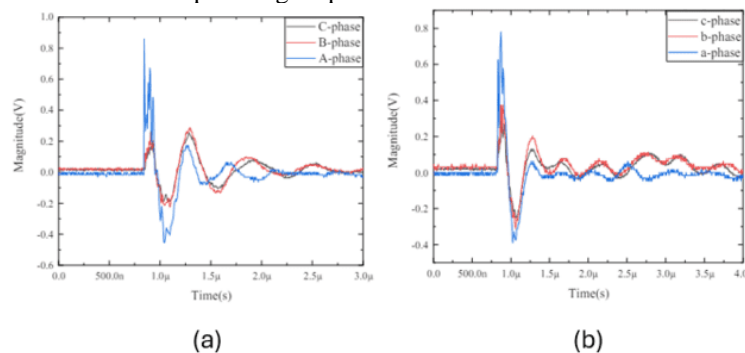
Judul penelitian ini adalah "Research on the Propagation Characteristics of High Frequency Partial Discharge Signal in Transformer" menunjukkan bahwa penelitian ini dilakukan untuk mempelajari bagaimana sinyal partial discharge frekuensi tinggi menyebar di dalam transformator. Penelitian ini dilakukan oleh Yang Li dan

Zhiguo Tang [10]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari karakteristik sinyal partial discharge (PD) berfrekuensi tinggi dan memahami bagaimana belitan transformator mempengaruhi penyebaran sinyal PD. Penelitian ini juga bertujuan untuk mensimulasikan berbagai jenis discharge (discharge eksternal, di dalam belitan, dan di luar belitan) guna menganalisis pola penyebaran sinyal PD pada transformator tiga fasa dua belitan 110kV.



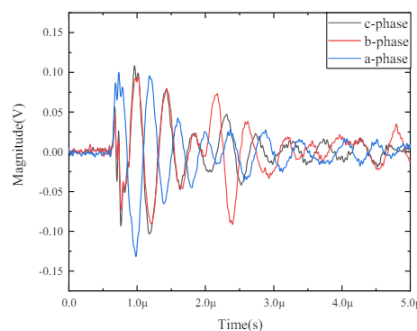
Gambar 16. Diagram Pengkabelan untuk Eksperimen Transformator [10]

Langkah-langkah penelitian ini dilakukan dengan menggunakan transformator SF10-31500/110 berbelitan ganda tiga fasa, model YNd11 dengan tegangan 110kV. Sinyal pulsa gelombang dan sinyal gelombang kotak diberikan di setiap terminal bushing keluar transformator, belitan, dan layar penutup. Sinyal dari semua terminal dikumpulkan untuk analisis. Diagram pengkabelan eksperimen ditunjukkan dalam Gambar 16. Sinyal pulsa digunakan untuk mempelajari karakteristik domain waktu, sedangkan sinyal gelombang kotak digunakan untuk mempelajari karakteristik domain frekuensi. Sinyal pulsa diberikan ke dalam transformator dari terminal fase A dan a. Sinyal yang diberikan terdiri dari pulsa gelombang untuk mempelajari karakteristik domain waktu dan gelombang kotak untuk mempelajari karakteristik domain frekuensi. Data sinyal dari fase A, B, C, netral, serta a, b, c dikumpulkan secara bersamaan seperti Gambar 17. Data ini berisi respons sinyal terhadap pemberian pulsa pada semua terminal yang terhubung. Pada proses pemberian sinyal ke fase tertentu pada trafo, tidak ada aliran listrik baik itu pada bagian primer atau sekunder.

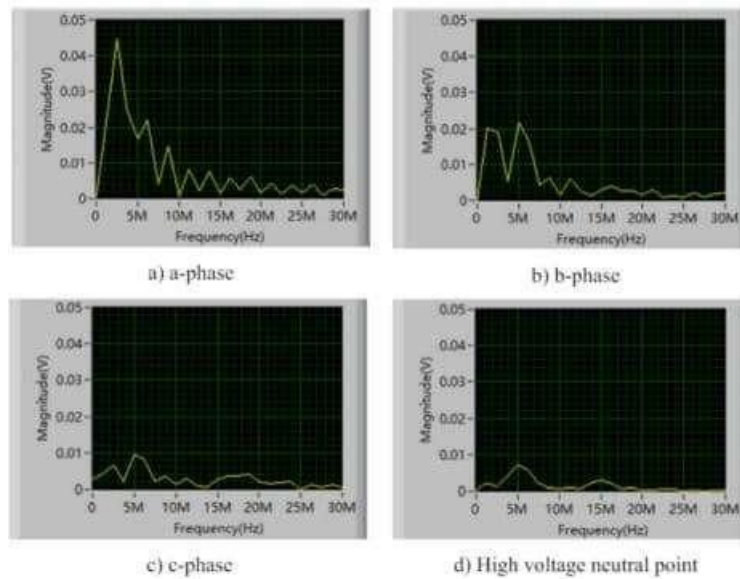


Gambar 17. Hasil Ukur Sinyal (a) Sinyal pada Tegangan Tinggi (b) Sinyal pada Tegangan Rendah [10]

Pada sinyal frekuensi rendah terdapat penurunan amplitudo yang signifikan karena lebih rentan terhadap kapasitansi antar belitan. Ini mengakibatkan sinyal frekuensi rendah mengalami penurunan amplitudo yang lebih besar. Sinyal frekuensi tinggi juga sedikit mengalami penurunan amplitudo karena memiliki impedansi yang rendah dan kurang terpengaruh oleh kapasitansi antar belitan. Sehingga, sinyal frekuensi tinggi dapat mempertahankan energi dan amplitudonya lebih baik selama propagasi melalui transformator.

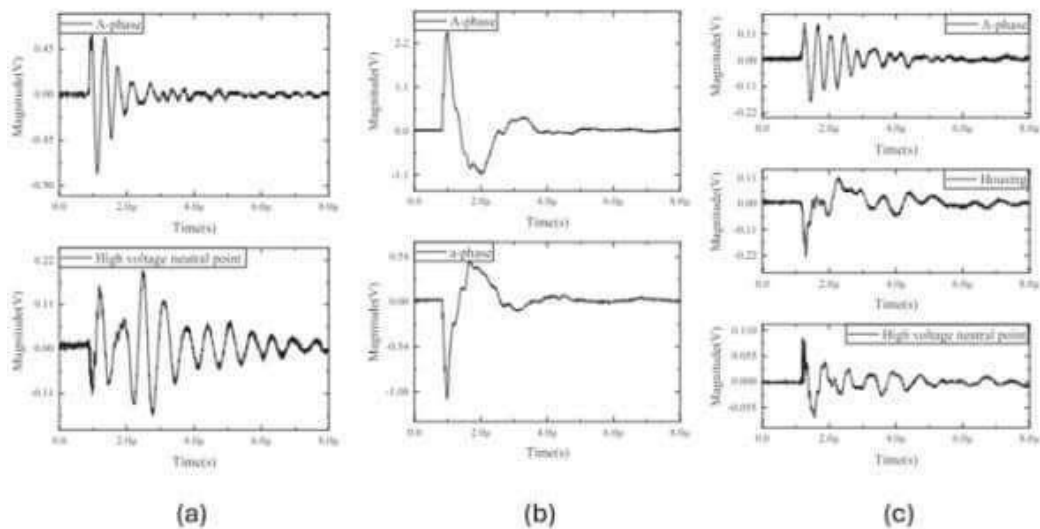


Gambar 18. Sinyal yang Dihasilkan pada Tegangan Rendah [10]



Gambar 19. Sinyal yang Dihasilkan pada Tegangan Rendah [10]

Dalam penelitian ini, pengujiannya terdapat tiga jenis discharge yang disimulasikan pada transformator: inter-turn discharge (discharge antar lilitan), inter-winding discharge (discharge antar belitan), dan winding-to-shell discharge (discharge antara belitan dan shell trafo). Ketiga jenis discharge ini disimulasikan dengan cara yang berbeda untuk menghasilkan sinyal-sinyal uji. Gelombang pada domain waktu dari ketiga jenis discharge ini menunjukkan perbedaan dalam polaritas gelombang pertama. Polaritas gelombang pertama dari inter-turn discharge berlawanan dengan sinyal netral, inter-winding discharge berlawanan dengan sinyal terminal tegangan tinggi dan rendah, dan winding-to-shell discharge berlawanan dengan sinyal terminal dan shell trafo.



Gambar 22. Sinyal Analog Discharge (a) Antar Lilitan (b) Antar Belitan (c) Antara Belitan dan Shell [10]

Penelitian ini juga mensimulasikan partial discharge internal di luar belitan transformator dengan memberikan sinyal discharge ke fase A transformator. Pada domain Waktu, gelombang responsnya menunjukkan bahwa polaritas gelombang pertama sama di setiap titik deteksi. Terdapat fluktuasi yang signifikan dalam sinyal, menunjukkan variasi yang besar dalam karakteristik sinyal pada titik deteksi. Untuk domain frekuensi, gelombang responsnya menunjukkan bahwa bagian frekuensi rendah dari setiap titik deteksi mengalami penurunan yang signifikan. frekuensi tinggi mengalami penurunan yang lebih sedikit, dan rasio energi dari bagian frekuensi tinggi secara signifikan lebih besar. Hal ini terjadi karena tidak adanya hubungan listrik langsung antara fase dan belitan transformator. Kesimpulannya bahwa sinyal frekuensi rendah sulit untuk ditransmisikan dari fase ke belitan transformator, sementara sinyal frekuensi tinggi dapat ditransmisikan ke belitan melalui kapasitor kopel.

Kesimpulan keseluruhannya bahwa sinyal partial discharge (PD) dari satu belitan dapat menyebar ke belitan lain dan dideteksi di semua terminal deteksi. Sinyal discharge terdiri dari frekuensi tinggi yang menyebar melalui kapasitansi antar belitan dan frekuensi rendah yang menyebar melalui belitan itu sendiri. Polaritas gelombang pertama dari sinyal domain waktu berbeda saat discharge terjadi di belitan internal, tetapi sama saat discharge terjadi di belitan luar. Discharge dari belitan luar terutama menyebar melalui kapasitansi, menyebabkan penurunan signifikan pada frekuensi rendah di setiap terminal deteksi.

4. Kesimpulan

Partial discharge (PD) pada transformator daya merupakan fenomena kritis yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi. Berbagai metode deteksi dan analisis telah dikembangkan untuk mengidentifikasi dan memahami PD, termasuk TDoA untuk menentukan lokasi sumber PD dengan beberapa sensor UHF, EMTR untuk memperbaiki sinyal PD melalui waktu balik elektromagnetik, dan metode SNR untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap noise. Sensor akustik mendeteksi gelombang suara dari PD di daerah yang sulit bagi sinyal elektromagnetik. Studi karakteristik sinyal PD, termasuk komponen frekuensi tinggi dan rendah serta pola propagasinya, keseluruhannya membantu dalam diagnosis yang tepat dan memastikan operasi transformator yang aman dan andal.

Referensi

- [1] M. Azadifar *et al.*, "Partial discharge localization using electromagnetic time reversal: A performance analysis," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147507–147515, 2020.
- [2] M. Aslam, M. S. Rehan, F. R. Albogamy, S. Murawwat, A. Basit, and G. Hafeez, "Prognostication of Failures Using Signal-to-Noise Ratio to Determine Partial Discharges Activities in Power Transformers," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 87500–87507, 2022.
- [3] V. Malažinskas *et al.*, "Evaluation of the insulation condition of high-voltage transformers by detecting partial discharges using the electromagnetic wave radiation method," *Materials and Technology*, vol. 55, no. 2, pp. 253–261, 2021.
- [4] M. Kunicki, "Analysis on acoustic disturbance signals expected during partial discharge measurements in power transformers," *Archives of Acoustics*, vol. 45, no. 4, 2020.
- [5] L. Damião *et al.*, "Online monitoring of partial discharges in power transformers using capacitive coupling in the tap of condenser bushings," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 17, p. 4351, 2020.
- [6] M. A. Azirani, M. Ariannik, P. Werle, and A. Akbari, "Optimal frequency selection for detection of partial discharges in power transformers using the UHF measurement technique," *Measurement*, vol. 172, p. 108895, 2021.
- [7] T. Mariprasath and M. Ravindaran, "An experimental study of partial discharge analysis on environmental friendly insulating oil as alternate insulating material for transformer," *Sādhanā*, vol. 47, no. 4, p. 204, 2022.
- [8] M. Florkowski and M. Kuniewski, "Partial Discharge-Originated Deterioration of Insulating Material Investigated by Surface-Resistance and Potential Mapping," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 16, p. 5973, 2023.
- [9] H. Besharatifard, S. Hasanzadeh, E. Heydarian-Forushani, H. H. Alhelou, and P. Siano, "Detection and analysis of partial discharges in oil-immersed power transformers using low-cost acoustic sensors," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 6, p. 3010, 2022.
- [10] Y. Li and Z. Tang, "Research on the propagation characteristics of high frequency partial discharge signal in transformer," in *Journal of physics: conference series*, IOP Publishing, 2022, p. 012066.