

Karakteristik *Breakdown Voltage* Pada Dielektrik Minyak Mineral dan Minyak Ester Natural

Hanifiyah Darna Fidya Amaral^{*a)}, Heri Sungkowo^{a)}, Galuh Prawestri Citra Handani^{a)}, Ahmad Hermawan^{a)}, Satria Lutfi Hermawan^{a)}, Herlambang Kresna Adi Ramadhana^{a)}, Nabilla Dinda Tri Agustin^{a)}

(Received 21 Agustus 2024 || Revised 22 September 2024 || Accepted 22 Oktober 2024)

Abstract: The increasing demand for electrical energy, driven by population growth and industrial development, necessitates efficient and sustainable power distribution systems. Transformers, essential components of these systems, typically use mineral oil for insulation and cooling, despite its environmental drawbacks, such as high carbon emissions and non-biodegradability. In response, natural ester oils have emerged as eco-friendly alternatives. This study aimed to compare the dielectric breakdown voltage characteristics of mineral oil (Diala B) and natural ester oil (FR3) in transformer applications. The testing followed the IEC 60156 standard, focusing on transformers operating at 20 kV, with a minimum breakdown voltage threshold of 30 kV/2.5mm. Both treated and untreated samples were examined. The results indicated that FR3 ester oil exhibited superior dielectric properties, including higher breakdown voltage, flashpoint, and firepoint, as well as lower carbon emissions compared to mineral oil. These findings suggest that natural ester oil has significant potential as a sustainable replacement for mineral oil, particularly in applications where environmental and safety concerns are prioritized. The study recommends further long-term testing under operational conditions to confirm the performance and stability of ester oil in real-world transformer applications. These findings contribute to the growing body of research supporting the transition to more environmentally friendly transformer insulation materials, which could have broad implications for the power industry's sustainability efforts

Keywords: Breakdown voltage, Mineral Oil, Natural Ester Oil, Transformer Insulating Oil, Dielectric Properties, IEC 60165

1. Pendahuluan

Seiring berjalannya waktu penggunaan energi listrik semakin hari mengalami peningkatan, faktor utama dari naiknya penggunaan energi listrik adalah bertambahnya jumlah penduduk dan munculnya berbagai macam industri, sehingga proses distribusi energi listrik terus mengalami permintaan, sementara proses pendistribusian ini membutuhkan komponen utama berupa trafo distribusi. [1] Salah satu hal yang menjadi sasaran utama dari penelitian ini adalah minyak transformator yang memiliki fungsi utama untuk menginsulasi bagian konduktif transformator dari *breakdown voltage*. [2] Banyak beberapa hal yang menjadi faktor utama dari turunnya kemampuan minyak dalam menahan *breakdown voltage* seperti pengaruh dari kontaminasi air, degradasi cat pada bodi transformator, dsb. [3] Sehingga sangat perlu untuk melakukan pengujian secara berkala untuk memastikan minyak masih dalam kondisi yang optimal dalam menahan *breakdown voltage*. [4]

Saat ini bahan utama dari minyak transformator sendiri kebanyakan masih menggunakan distilasi dari minyak bumi (petroleum) yang mana bahan ini *non-biodegradable*, kurang ramah lingkungan karena menyumbang cukup banyak emisi karbon serta bahan baku yang sangat *non-renewable* [5]. Oleh karenanya, muncul alternatif baru berupa minyak nabati untuk menggantikan bahan tersebut. Minyak nabati ini akan mengalami proses transesterifikasi terlebih dahulu agar dapat digunakan sebagai minyak isolasi [6]. Minyak ester natural memiliki serangkaian kelebihan jika dibandingkan dengan minyak mineral salah satu hal yang utama adalah ramah lingkungan yang mana bahan-bahan utamanya berupa tumbuh-tumbuhan (sumber daya terbarukan) [7] lalu tidak toksik, tidak mudah terbakar, *flashpoint* tinggi, dan dapat mengurangi emisi karbon 50-60 kali minyak mineral. [6]

Jenis minyak yang secara spesifik digunakan dalam penelitian ini adalah minyak mineral diala B serta minyak ester natural FR3. Guna mengetahui karakteristik dielektrik masing-masing minyak maka dilakukan pengujian *breakdown voltage* untuk tegangan transformator yang beroperasi pada 20kV (transformator distribusi)

yang mana menggunakan metode tes berlandaskan pada IEC 60156 (30kV \geq 2.5mm).

2. Metode

Penelitian ini secara garis besar membahas terkait karakteristik dielektrik *breakdown voltage* pada minyak mineral jenis diala B dan minyak ester natural FR3. Sehingga parameter yang digunakan untuk mendapatkan data dari studi yang dilakukan meliputi hal berikut.

2.1 Dielektrik Cair

Kekuatan dielektrik adalah ukuran kemampuan suatu material untuk menahan tegangan tinggi tanpa mengalami kegagalan dielektrik. Kekuatan dielektrik cair dipengaruhi oleh sifat atom dan molekul cairan itu sendiri, material elektroda, suhu, jenis tegangan yang diberikan, gas yang ada dalam cairan, dan faktor lain yang dapat mengubah sifat molekul cairan. Dalam isolasi cair, kekuatan dielektrik setara dengan tegangan yang terjadi. Menurut hukum Paschen, kekuatan dielektrik cair berkisar sekitar 107 V/cm. Dielektrik cair mengisi volume ruang yang harus diisolasi dan secara bersamaan mendisipasikan panas yang timbul melalui konveksi. Dielektrik cair memiliki kerapatan 1000 kali lebih besar daripada dielektrik gas, sehingga kekuatan dielektriknya lebih tinggi. Kelebihan lain dari dielektrik cair murni adalah kemampuannya untuk memperbaiki diri sendiri jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*). Namun, salah satu kekurangan dielektrik cair adalah mudah terkontaminasi. [8]

2.1.1 Minyak Mineral Diala B

Minyak trafo Diala B adalah minyak mineral yang banyak digunakan sebagai cairan isolasi dan pendingin dalam transformator, dikenal karena performanya yang stabil dan biaya yang relatif terjangkau. Minyak ini memiliki kekuatan dielektrik tinggi, stabilitas termal baik, titik nyala dan titik bakar tinggi, serta viskositas yang sesuai untuk memastikan aliran dan distribusi panas yang efektif dalam transformator. Penggunaan minyak Diala

B membantu dalam pendinginan, isolasi listrik, dan proteksi korosi pada transformator. Meski memiliki keunggulan seperti biaya efektif, ketersediaan yang mudah, dan performa yang teruji, minyak ini juga memiliki kelemahan seperti risiko kontaminasi dan degradasi seiring waktu. Dibandingkan dengan minyak ester seperti FR3 yang lebih ramah lingkungan, memiliki titik nyala dan titik bakar lebih tinggi, serta kemampuan self-healing, minyak DIALA B tetap menjadi pilihan utama dalam aplikasi transformator karena stabilitas dan keterjangkauannya. Namun, minyak ester menawarkan keuntungan tambahan dalam hal keberlanjutan dan keselamatan, meskipun dengan biaya yang lebih tinggi[6]. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi dan meningkatkan kinerja minyak isolasi dalam rangka memenuhi kebutuhan industri tenaga listrik yang terus berkembang.

2.1.2 Minyak Ester Natural FR3

Minyak isolasi transformator berjenis ester natural yang berasal dari turunan minyak nabati dimana penggunaannya dengan mengurangi viskositasnya menggunakan metode transestrifikasi. Metode transestrifikasi digunakan karena lebih mudah jika dibandingkan dengan metode lainnya. Transestrifikasi sendiri merupakan proses dimana membuat trigliserida bereaksi dengan alkohol dengan menggunakan katalis untuk menghasilkan alkil-ester dan produk sampingan gliserol. Katalis yang kebanyakan digunakan adalah sodium hidrosida (NaOH) dan potasium hidrosida (KOH) karena bisa mempermudah proses pembuatan. [7]

Untuk minyak ester yang akan kami gunakan adalah jenis FR3 yang mana merupakan turunan dari minyak biji-bijian. Minyak ester natural sendiri memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan minyak mineral yakni bebas silikon, halogens dan petroleum. Ester natural memiliki keunggulan yaitu nilai tegangan tembus yang tinggi, tidak toksik, tidak mudah terbakar, *flashpoint* yang tinggi, dan titik api yang tinggi, kelebihan ester natural untuk lingkungan adalah mengurangi emisi karbon 50-60 kali minyak mineral [6]

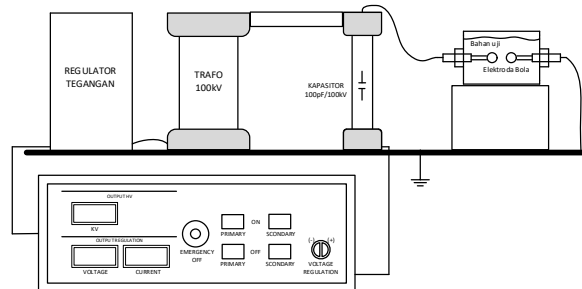
2.2 Breakdown Voltage

Breakdown voltage adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh bahan dielektrik sebelum terjadi kegagalan isolasi[9]. Untuk mengukur kemampuan dielektrik suatu minyak saat terjadi tegangan tembus maka dilakukan pengujian berdasarkan pada IEC 60153 yang mana batas minimum yang diizinkan senilai $\geq 30\text{kV}/2,5\text{mm}$.

2.3 Pengujian Breakdown Voltage

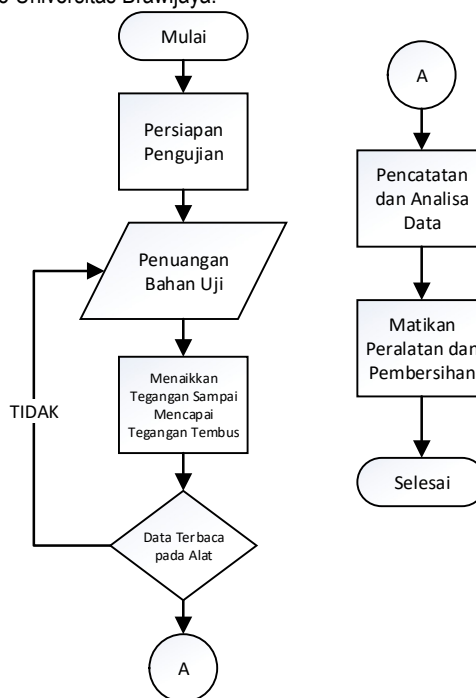
Pengujian *breakdown voltage* yang dilakukan menggunakan standar IEC 60156. Minyak trafo yang digunakan pada pengujian ini adalah minyak trafo shell diala B dan minyak ester FR3. Untuk mendapatkan nilai tegangan tembus dari minyak trafo ini, minyak di uji dengan menggunakan rangkaian uji yang ditunjukkan Gambar 2.1.

Pada rangkaian pengujian digunakan trafo uji 1 fasa 3 belitan yang dihubungkan secara paralel dengan CM (pembagi tegangan kapasitif). Kapasitor CM terhubung secara seri dengan DSM (pengukur tegangan tinggi AC). Kemudian dihubungkan secara paralel dengan sela bola (objek pengujian *breakdown voltage*).



Gambar 2.1 Rangkaian Pengujian

Gambar 2.2 merupakan serangkaian tahapan pengujian untuk studi karakteristik dielektrik *breakdown voltage* pada minyak mineral dan ester natural yang dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Brawijaya.



Gambar 2.2 Flow Chart Pengujian

2.4 Pre-treatment

Minyak transformator bisa terpapar oleh berbagai jenis kontaminan seperti kelembaban, serat, resin, dan lainnya. Ketidakhadiran dapat tetap ada dalam minyak akibat proses pemurnian yang tidak sepenuhnya efisien[10]. Pencemaran ini bisa terjadi selama transportasi dan penyimpanan minyak, selama penggunaannya, dan bahkan minyak itu sendiri dapat menyebabkan pencemaran[11]. Pre-treatment yang digunakan berupa metode *drying* yang memanfaatkan panas oven sehingga kadar air yang berada di dalam minyak berkurang akibat evaporasi. Proses ini dilakukan dengan suhu 110° yang idealnya untuk minyak inisial dilakukan selama 24 jam[12], namun kami hanya melakukan selama 4 jam dikarenakan keterbatasan alat yang dimiliki.

Menilai kondisi sampel minyak, perlu dilakukan perbandingan hasil uji dengan standar tertentu. Pengujian tegangan tembus pada isolasi minyak trafo dijalankan pada suhu 30°C dan melibatkan dua

jenis minyak trafo dengan kondisi baru. Standar yang digunakan untuk minyak trafo merujuk kepada Standar IEC 60156 [13] dan spesifikasinya tercantum dalam Tabel 2.1 [14]:

Tabel 2.1 Standar Tegangan Tembus

No	Tegangan Trafo	Batas Tegangan Tembus yang Diperbolehkan
1	70 < U _n ≤ 170 kV	≥ 40 kV / 2,5 mm
2	36 < U _n ≤ 70 kV	≥ 35 kV / 2,5 mm
3	≤ 36 kV	≥ 30 kV / 2,5 mm

Pengujian ini akan merujuk pada nomor 3 pada Tabel 2.1 yang menggunakan tegangan uji sebesar ≤ 36kV. Standar ini akan diberlakukan pada kedua jenis minyak yakni minyak mineral dan minyak ester natural.

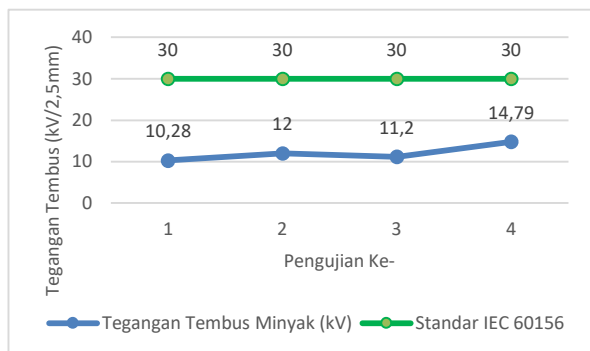
3. Hasil dan pembahasan

Pengujian yang telah dilakukan pada minyak trafo shell diala B dengan metode uji IEC 60156 dan rangkaian pengujian pada gambar 2.1. Data pengujian yang didapatkan adalah sebagai berikut :

1. Pengujian tegangan tembus berdasarkan pada standar IEC 60156 dengan perbandingan minyak mineral yang mengalami *treatment* dan tidak mengalami *treatment*
2. Pengujian tegangan tembus pada minyak ester FR3 dan minyak mineral Diala B berdasarkan standar IEC 60156.

3.1 Hasil Analisis Percobaan Breakdown Voltage Berdasarkan pada standar IEC 60156 dengan Perbandingan Minyak Mineral yang Mengalami Treatment dan Tidak Mengalami Treatment

Pada hasil percobaan ini didapati bahwasannya minyak yang tidak mengalami *treatment* akan memiliki nilai *breakdown voltage* yang kecil dan bahkan dibawah standar yang telah ditentukan oleh IEC 60156 yang mana diadaptasi oleh SPLN 49-1 1982 menyatakan bahwasannya pengujian minyak transformator dengan tegangan nominal 20kV harus memiliki nilai tegangan tembus sekecil-kecilnya 30kV/2,5mm.

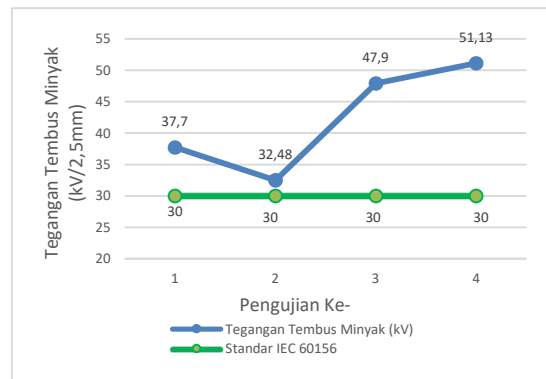


Gambar 3.1 Pengujian Sebelum Treatment

Grafik 3.1 menyatakan nilai *breakdown voltage* dari minyak mineral yang kami uji berada di bawah standar yang berlaku namun memiliki kecenderungan kenaikan nilai *breakdown voltage* saat dilakukannya percobaan, sehingga dari sini dapat diasumsikan

bahwa pengaruh suhu begitu besar terhadap percobaan ini, sehingga dilakukan *treatment* untuk mendapatkan hasil yang memuaskan. *Treatment* ini seharusnya dilakukan selama 24 jam dengan suhu 110° menggunakan metode *drying* [15] akan tetapi kami hanya melakukannya selama 4 jam dikarenakan keterbatasan alat *drying* yang kami gunakan. Namun hasil yang kami dapati masih memenuhi standar yang berlaku.

Pada grafik 3.2 menyatakan bahwa nilai *breakdown voltage* setelah mengalami *treatment* menghasilkan nilai yang jauh lebih tinggi dan nilai rata-rata dari tegangan tembus tersebut telah memenuhi standar IEC 60156 yakni berada ≥ 30kV/2,5mm. *Water content* sendiri menjadi penyebab dari *partial discharge* yang mana terjadi tegangan tembus diantara molekul-molekul air yang terkandung di dalam minyak tersebut. Sebab itu, pada percobaan awal nilai dari *breakdown voltage* sangatlah kecil. Lantas dilakukanlah *treatment* selama 4 jam. Selain *water content*, durasi penggunaan minyak masih dalam keadaan optimal karena minyak tidak diendapkan terlalu lama sebelum pengujian *breakdown voltage*, sehingga dihasilkan nilai *breakdown voltage* yang cukup tinggi.



Gambar 3.2 Grafik Pengujian Sesudah Treatment

Saat terjadinya tegangan tembus akan muncul suara mendesis dari minyak tersebut dikarenakan tegangan berusaha menembus kemampuan isolasi dari minyak mineral yang diuji dan setelah terjadinya *breakdown voltage* diatas 30kV minyak memiliki perubahan warna yakni sedikit menjadi lebih gelap akibat dari suhu tinggi yang ditimbulkan oleh tegangan yang tinggi sehingga terjadi karbonasi dalam minyak tersebut.

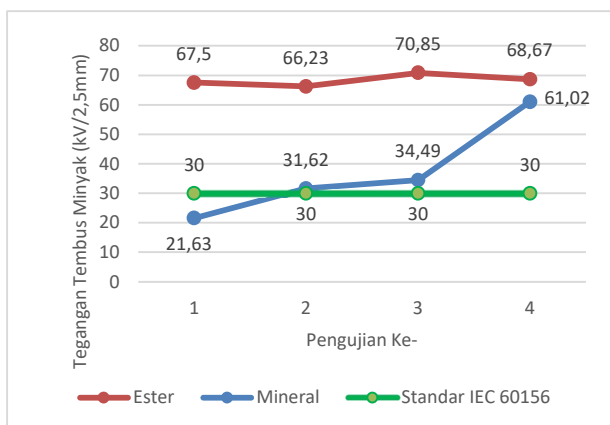
3.2 Hasil Analisis Percobaan Breakdown Voltage pada Minyak Ester FR3 dan Minyak Mineral Shell Diala-B Berdasarkan pada Standar IEC 60156

Pada minyak ester standar yang diberlakukan untuk nilai tegangan tembus tidak berbeda dengan minyak mineral yakni berdasarkan pada IEC60153 dengan nilai ≥30kV/2,5mm. Dari hasil pengujian yang kami lakukan didapati nilai rata-rata yang bisa dibilang terlampau cukup tinggi untuk penggunaan transformator distribusi dan juga nilai awal tegangan tembus yang didapati jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan minyak mineral.

Analisis yang kami lakukan dengan melakukan *breakdown* pada tegangan kedua minyak adalah dengan melakukan pengujian pada masing-masing minyak sebanyak 4 kali yang mana seharusnya pada standar IEC60153 dilakukan 6 kali pengujian guna mendapati hasil rata-rata yang maksimal jika terjadi

perbedaan nilai setiap kali dilakukannya pengujian. Alasan kami hanya melakukan 4 kali pengujian *breakdown voltage* pada kedua minyak karena hasil yang didapat cukup stabil untuk mendapat rata-rata yang memenuhi dari standar IEC60153 yang berlaku.

Pada grafik 3.3 nilainya sangatlah tinggi bahkan sempat menembus pada nilai 70,85kV, dari sini dapat dianalisis karakteristik umum minyak ester memiliki nilai tegangan tembus yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan minyak mineral. Semua tegangan tembus yang dilakukan sebanyak 4 kali uji dan menghasilkan nilai lebih besar dari 30 kV dimana Kedua minyak juga mengalami *treatment* yang sama. Namun, minyak mineral dan ester memiliki kesamaan sifat saat dilakukannya *breakdown voltage* yakni memiliki residu karbon.



Gambar 3.3 Grafik Perbandingan Hasil Pengujian *Breakdown Voltage* Minyak Ester dan Minyak Mineral

Pada pengujian *breakdown voltage*, minyak ester dan natural memiliki perbedaan hasil. Tidak hanya unggul dalam pengujian *breakdown voltage*, dari beberapa jurnal yang kami sandarkan dinyatakan bahwasannya minyak ester memiliki *water content* yang tinggi jika dibandingkan minyak mineral. IEC 60814 menyatakan bahwasannya *water content* minyak ester natural dianggap layak untuk digunakan sebagai bahan isolasi minyak transformator bernilai ≤ 200 ppm sementara untuk minyak mineral pada IEC 60422 ≤ 30 ppm. Meski kami tidak melakukan pengujian terhadap *water content* karena pembatasan masalah kami namun hasil *breakdown voltage* dapat membuktikan bahwa minyak ester jauh lebih unggul.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari percobaan *Breakdown Voltage* pada minyak mineral dan ester sebagai berikut:

1. Pengaruh *treatment* minyak akan sangat berpengaruh terhadap hasil pengujian *breakdown voltage*, efek kontaminan terhadap kemampuan dielektrik minyak akan memiliki hasil yang lebih kecil jika dibandingkan dengan yang sudah mengalami *treatment*. Salah satu kontaminan yang mungkin ada pada minyak baru adalah kadar air sehingga harus di evaporasi terlebih dahulu sebelum dilakukannya pengujian.
2. Pengujian menunjukkan bahwa tegangan tembus (kemampuan untuk menahan tegangan tanpa terjadi kerusakan) pada minyak ester lebih tinggi dibandingkan

dengan minyak mineral. Setelah setiap pengujian ulang, nilai tegangan tembus cenderung meningkat. Hal ini disebabkan oleh peningkatan suhu yang terjadi setelah proses *breakdown voltage* (tegangan di mana minyak tidak bisa lagi menahan tegangan dan mulai mengalami kerusakan). Pada pengujian minyak mineral, tegangan tembus awal adalah 34kV dan meningkat secara signifikan menjadi 51,3kV setelah beberapa kali pengujian. Peningkatan yang sama juga diamati pada pengujian minyak lainnya, menunjukkan bahwa kenaikan tegangan tembus ini adalah fenomena umum yang terjadi pada berbagai jenis minyak setelah beberapa kali pengujian.

3. Pengaruh bejana uji terhadap tegangan tembus minyak cukup berpengaruh pada pengujian *breakdown voltage*, meskipun terdapat sedikit perbedaan, hasil ini tetap berada dalam batas toleransi yang dapat diterima sesuai dengan standar IEC 60156. Hal ini menunjukkan bahwa alat pengukur di laboratorium tersebut dapat diandalkan untuk keperluan penelitian dan pengujian di bidang teknik elektro.

Referensi

- [1] S. Manjang, I. Kitta, and A. Ikhlis, *Voltage Breakdown Characteristics of Transformer Mineral Oil with Varies the Composition of Corn Oil*. 2019.
- [2] Badaruddin and F. Agung Firdianto, "ANALISA MINYAK TRANSFORMATOR PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA DI PT. X," 2019.
- [3] S. Maneroot and N. Pattanadech, *Effect of Contaminant on Breakdown Characteristics of Mineral Oil and Commercial Natural Ester*. Bangkok: IEEE, 2018.
- [4] N. Rosyidi, "PENGUJIAN TEGANGAN TEMBUS PADA MINYAK TRAFU."
- [5] S. O. Oparanti, I. Fofana, R. Jafari, and R. Zarrougui, "A state-of-the-art review on green nanofluids for transformer insulation," Feb. 15, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.molliq.2024.124023.
- [6] A. Kumar, "Natural Ester Oil a Sustainable Alternative Insulation Oil to Mineral Oil for Power Transformer Industries and Electric Power System," pp. 119–125, 2022.
- [7] P. Rozga, A. Beroual, P. Przybylek, M. Jaroszewski, and K. Strzelecki, "A review on synthetic ester liquids for transformer applications," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 23, Dec. 2020, doi: 10.3390/en13236429.
- [8] Badaruddin and F. Agung Firdianto, "ANALISA MINYAK TRANSFORMATOR TIGA FASA DI PT. X," 2019.
- [9] I. N. O. Winanta, A. A. N. Amrita, and W. G. Ariastina, "Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator," *Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator*, vol. 6, no. 3, pp. 10–18, 2019.
- [10] M. Fikri, D. Johar Damiri, M. Rezha Safariansyah, S. Pratiwi, and dan M. Reza Hidayat, "Pengaruh Kontaminan Air terhadap Tegangan Tembus Isolasi Cair Minyak Mineral dan Nabati sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator," vol. 21, no. 01, pp. 42–51, 2022, [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- [11] S. Karim, "Pengaruh Kondisi Minyak Terhadap Keandalan Sistem Kerja Trafo".

- [12] M. Ahmad, I. Daris, H. Rahmat, and S. Suwarno, "Aging Behavior of Mineral Oil, Gas-to-Liquid (GTL), and Natural Ester Liquids in Presence of Cellulosic Materials," in *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 501–506. doi: 10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601042.
- [13] M. Ahmad, I. Daris, H. Rahmat, and S. Suwarno, "Aging Behavior of Mineral Oil, Gas-to-Liquid (GTL), and Natural Ester Liquids in Presence of Cellulosic Materials," in *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 501–506. doi: 10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601042.
- [14] "SPLN-49-1-1982," 1982.
- [15] M. Ahmad, I. Daris, H. Rahmat, and S. Suwarno, "Aging Behavior of Mineral Oil, Gas-to-Liquid (GTL), and Natural Ester Liquids in Presence of Cellulosic Materials," in *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, ICHVEPS 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 501–506. doi: 10.1109/ICHVEPS53178.2021.9601042.