

SKRIPSI

**PENGARUH KONTAMINAN PARTIKEL SELULOSA TERHADAP
KARAKTERISTIK TEGANGAN TEMBUS MINYAK
ESTER ALAM *SOYBEAN OIL***



**Dibuat untuk Memenuhi Persyaratan Mendapatkan Gelar Sarjana
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya**

Oleh :

**RAMA NUGRAHA RISKI AKBAR
NIM. 03041382025108**

**UNIVERSITAS SRIWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
TAHUN 2024**

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

**PENGARUH KONTAMINAN PARTIKEL SELULOSA TERHADAP
KARAKTERISTIK TEGANGAN TEMBUS MINYAK
ESTER ALAM *SOYBEAN OIL***

Oleh:

**RAMA NUGRAHA RISKI AKBAR
NIM. 03041382025108**

Telah diperiksa kebenarannya, diterima dan disahkan

**Palembang, November 2024
Ketua Jurusan Teknik Elektro,**



**Ir. Muhammad Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D., IPU.
NIP. 197108141999031005**

LEMBAR PERSETUJUAN

SKRIPSI

**PENGARUH KONTAMINAN PARTIKEL SELULOSA TERHADAP
KARAKTERISTIK TEGANGAN TEMBUS MINYAK
ESTER ALAM *SOYBEAN OIL***

Oleh:

**RAMA NUGRAHA RISKI AKBAR
NIM. 03041382025108**

**Telah diperiksa kebenarannya, diterima dan disetujui untuk diujikan
guna memenuhi persyaratan memperoleh gelar
Sarjana Teknik Elektro**

**Palembang, November 2024
Dosen Pembimbing,**



**Ir. Hj. Dwirina Yuniarti, M. T
NIP. 196106181989032003**

LEMBAR PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Rama Nugraha Riski Akbar
Nomor Induk Mahasiswa : 03041382025108
Fakultas : Teknik
Jurusan/Prodi : Teknik Elektro/Teknik Elektro
Universitas : Universitas Sriwijaya
Persentase plagiarism (*Turnitin*) : 7%

Dengan ini menyatakan karya ilmiah berupa skripsi dengan judul “Pengaruh Kontaminan Partikel Selulosa Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Ester Alam *Soybean Oil*”, merupakan karya saya sendiri dan benar keasliannya. Apabila ternyata dikemudian hari karya ilmiah ini merupakan hasil plagiat dari karya ilmiah orang lain, maka saya akan bertanggung jawab dan bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan hukum yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam kesadaran dan tanpa paksaan.

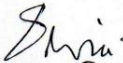
Palembang, November 2024

Ya



Rama Nugraha Riski Akbar
NIM. 03041382025108

Saya sebagai pembimbing dengan ini menyatakan bahwa saya telah membaca dan menyetujui skripsi ini dan dalam pandangan saya lingkup dan kualitas ini mencukupi sebagai skripsi.

Tanda Tangan :  _____

Pembimbing Utama : Ir. Hj. Dwirina Yuniarti, M. T

Tanggal : November 2024

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa berkat rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penyusun dapat menyelesaikan penelitian dengan judul “Pengaruh Kontaminan Partikel Selulosa Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Ester Alam *Soybean Oil*”.

Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan studi S1 Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Penyusunan skripsi ini dibuat berdasarkan pada kajian literatur, studi pustaka yang berkaitan, dan eksperimen serta pengambilan data secara langsung di Laboratorium *Electrical Energy and Safety*.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan penelitian ini masih banyak terdapat kekurangan dan kesalahan, untuk itu penyusun mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi kesempurnaan laporan ini. Akhir kata penyusun berharap semoga laporan penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan semua pihak.

Palembang, November 2024

Rama Nugraha Riski Akbar
NIM. 03041382025108

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya ilmiah skripsi ini penulis dedikasi dan persembahkan, sebagai penghargaan, dan rasa hormat penulis kepada:

- Orang tua dan keluarga yang telah memberikan motivasi, saran, serta dukungan yang terbaik.
- Bapak Prof. Ir. Zainuddin Nawawi, Ph.D., Ibu Ir. Dwirina Yuniarti, M.T., Ibu Rizda Fitri Kurnia, S.T., M.Eng., Bapak Djulil Amri, S.T., M.T., dan Dan Ibu Dr. Ir. Syarifa Fitria yang telah meluangkan waktu dan pikiran dalam membimbing penulis untuk menyelesaikan tugas akhir skripsi;
- Rektor Universitas Sriwijaya Bapak Prof. Dr. Taufiq Marwa, S.E., M.Si.;
- Dekan Fakultas Teknik Bapak Dr. Ir. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T., IPM.;
- Bapak Muhammad Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D., IPU selaku ketua jurusan, Bapak dan Ibu dosen-dosen serta administrasi dan akademik Jurusan Teknik Elektro;
- Ibu Hj. Rahmawati, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan waktu dan dukungan selama penulis menjalani pendidikan;
- Pranata dan senior di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik (TTTPL) Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, Pak Lukmanul Hakim, S.T., Kak Intan Dwi Putri S.T., dan Kak Ferlian Seftianto, S.T., M.Kom.;
- Teman-teman seperjuangan, seluruh anggota Laboratorium Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik

(TTTTPL) Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya Angkatan 2020 yaitu Fadlu, Bhanunasmi, Elam, Meiwa, Muthia, Aldhi, Rangga, Adziin, Ridwan, Ryan, Hilman, Derry, Iqbal, Aldo, Rangga, Sahrul, Ravi, Kurniawan, Lutfi, Eric, Trio, Ahmed, dan Mozmail yang telah terlibat dan mendukung penelitian;

- Rekan-rekan penelitian isolasi cair yaitu, Aldo, Bhanu, Derry, Rangga, dan Mozamil;
- Dea Ayu Juniarti, yang tak henti-hentinya memberikan dukungan moral, selalu mendukung, serta mendengar keluh kesah tentang penulisan ini dan menemani penulis hingga menyelesaikan skripsi ini dari awal hingga akhir.
- Teman-teman kosan kebun sirih satelit Irvin, Bimo, Wisnu, Bhanu, Raga, Ridwan, Hilman, Ravi, Rizki, Jordy, Vito;
- Rekan-Rekan Emperors nexus, kak lugas, Wahyu, Dwiqi, Fikron, Naufal, Gilang, Iqbal, Arif, Brian;
- Teman-teman mahasiswa Teknik Elektro Angkatan 2020, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya;

Penulis berdoa kepada Allah SWT, semoga diberikan ganjaran pahala atas semua keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan.

Palembang, November 2024

Rama Nugraha Riski Akbar
NIM. 03041382025090

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademika Universitas Sriwijaya, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rama Nugraha Riski Akbar
Nomor Induk Mahasiswa : 0304138202108
Fakultas : Teknik
Jurusan/Prodi : Teknik Elektro/Teknik Elektro
Jenis Karya : Skripsi

Untuk kepentingan pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya **Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul, “Pengaruh Kontaminan Partikel Selulosa Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Estrer Alam *Soybean Oil*” beserta perangkat yang ada.

Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini, Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tulisan saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Palembang, November 2024
Yang

Rama
NIM



©D47AMX044906219

ABSTRAK

PENGARUH KONTAMINAN PARTIKEL SELULOSA TERHADAP KARAKTERISTIK TEGANGAN TEMBUS MINYAK ESTER ALAM *SOYBEAN OIL*

(Rama Nugraha Riski Akbar, 03041382025108, 2024, xx+30 halaman + lampiran)

Penelitian ini membahas pengaruh partikel selulosa sebagai kontaminan minyak ester alami *soybean oil*. Pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan tembus terhadap sampel minyak kedelai murni(kontrol), dan minyak kedelai yang diberi kontaminan partikel selulosa dengan konsentrasi 0,05 ; 0,1; 0,2 g/l dan dipanaskan pada temperatur 25, 30, 35°C. Pengujian dilakukan menggunakan *test cell* dengan kapasitas 500 ml. Sistem elektroda bola-bola berdiameter 13 mm dengan jarak sela 2,5 mm sesuai dengan IEC60156. Hasil pengujian tegangan tembus pada *soybean oil* yang dipanaskan pada temperatur 25°C dan ditambahkan kontaminan partikel selulosa dengan konsentrasi 0,05; 0,1; 0,2 g/l secara berturut diperoleh nilai sebesar 15,34; 13,77; 12,57 kV. Untuk temperatur 30°C didapatkan nilai sebesar 17,81; 15,85; 13,06 kV, dan pada temperatur 35°C sebesar 22,19; 19,56; 17,55 kV secara berturut-turut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan kontaminan partikel selulosa menyebabkan penurunan tegangan tembus yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh partikel selulosa yang menjadi lebih reaktif pada suhu tinggi, sehingga mempercepat degradasi sifat isolasi minyak.

Kata Kunci: Minyak Kedelai, Partikel Selulosa, Tegangan Tembus, Temperatur

ABSTRACT

EFFECT OF CELLULOSE PARTICLES CONTAMINANTS ON BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF NATURAL ESTER SOYBEAN OIL

(Rama Nugraha Riski Akbar, 03041382025108, 2024, xx + 30 pages + appendix)

This study investigates the effect of cellulose particles as contaminants in natural ester oil, specifically soybean oil. The testing was conducted by measuring the breakdown voltage of pure soybean oil (control) and soybean oil contaminated with cellulose particles at concentrations of 0.05, 0.1, and 0.2 g/L, heated at temperatures of 25°C, 30°C, and 35°C. The tests were carried out using a 500 ml capacity test cell. A ball-ball electrode system with a diameter of 13 mm and a gap of 2.5 mm, in accordance with IEC60156, was used. The breakdown voltage results for soybean oil heated to 25°C and contaminated with cellulose particles at concentrations of 0.05, 0.1, and 0.2 g/L were 15.34, 13.77, and 12.57 kV, respectively. At 30°C, the values were 17.81, 15.85, and 13.06 kV, and at 35°C, they were 22.19, 19.56, and 17.55 kV, respectively. The results indicate that the addition of cellulose particle contaminants significantly decreases the breakdown voltage. This is attributed to the increased reactivity of cellulose particles at higher temperatures, which accelerates the degradation of the oil's insulating properties.

Keywords: *Soybean Oil, Cellulose Particle, Breakdown Voltage, Temperature*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PERSETUJUAN	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PERNYATAAN	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK.....	x
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR PERSAMAAN	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
NOMENKLATUR	xix
DAFTAR ISTILAH.....	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Hipotesis.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Isolator.....	5
2.2 Dielektrik Cair.....	5

2.3 Minyak Nabati.....	7
2.4 Minyak Kedelai (<i>Soybean Oil</i>).....	8
2.5 Partikel Selulosa ($C_6H_{10}O_5$).....	8
2.6 Kekuatan Dielektrik	9
2.7 Tegangan Tembus (<i>Breakdown Voltage</i>) Isolasi Cair	10
2.8 Penelitian Terdahulu.....	12
BAB III METODOLOGI DAN EKSPERIMENTAL	16
3.1 Pendahuluan	16
3.2 Metode Penelitian.....	16
3.3 Bahan Penelitian.....	18
3.3.1 Minyak kedelai.....	18
3.3.2 Partikel Selulosa ($C_6H_{10}O_5$)	19
3.4 Peralatan	19
3.4.1 Neraca Digital	19
3.4.2 Glass Beaker	20
3.4.3 <i>Magnetic Stirrer</i>	20
3.4.4 Transformator Tegangan Tinggi Bolak-balik.....	20
3.5 Sampel yang digunakan.....	21
3.5.1 Bahan dan Komposisi	21
3.5.2 Proses Pembuatan Sampel Uji	21
3.6 Experimental Setup	22
3.6.1 Sistem Elektrode	22
3.6.2 Rangkaian Pengujian.....	23
3.7 Prosedur Pengujian.....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Umum.....	25
4.2 Hasil Eksperimental	25

4.3 Diskusi.....	28
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	30
5.1 Kesimpulan.....	30
5.2 Saran.....	30
DAFTAR PUSTAKA.....	31
LAMPIRAN	36

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3. 2 Minyak Kedelai Sania Royale Oil 1 Liter	18
Gambar 3. 3 Partikel Selulosa.....	19
Gambar 3. 4 Neraca Digital	19
Gambar 3. 5 Glass Beaker	20
Gambar 3. 6 Magentic stirer	20
Gambar 3. 7 Alur proses penyiapan sampel uji	21
Gambar 3. 8 Desain Sistem Elektroda	22
Gambar 3. 9 Sistem Elektroda	22
Gambar 3. 10 Rangkaian Pengujian Tegangan Tembus	23
Gambar 4. 1 Hasil Pengujian tegangan tembus SO+ Partikel selulosa pada temperatur 25°C	25
Gambar 4. 2 Hasil pengujian tegangan tembus SO+ Partikel selulosa pada temperatur 30°C	26
Gambar 4. 3 Hasil pengujian tegangan tembus SO+ partikel selulosa pada temperatur 35°C	27

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Standar Isolasi Minyak IEC 60422-2013.....	6
Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu	12
Tabel 3. 1 Informasi Kandungan Minyak Kedelai Merk Sonia Royale Oil	18

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2.1.....	9
Persamaan 2.2.....	10
Persamaan 2.3.....	10

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Tahap-Tahap Kegiatan Penelitian
- Lampiran 2 Data Hasil Pengukuran
- Lampiran 3 Pembacaan Pengukuran Nilai Tegangan Tembus
- Lampiran 4 Perhitungan Tembus Sesungguhnya
- Lampiran 5 Lembar Plagiarisme *Turnitin*
- Lampiran 6 SULIET/USEPT

NOMENKLATUR

V_b	Tegangan Tembus
A	Konstanta
n	Nilai konstanta (0,947)
V_s	Tegangan tembus dalam keadaan normal (volt)
V_b	Tegangan tembus sebenarnya (volt)
δ	Faktor koresi udara (mmHg/°C)
p	Tekanan udara (mmHg)
p_0	Standar tekanan udara (760 mmHg)
t_0	20°C
t	Suhu ruangan saat pengujian (°C)

DAFTAR ISTILAH

<i>Breakdown Voltage</i>	= Tegangan Tembus
<i>Fire point</i>	= Titik Nyala Api
<i>Flash Point</i>	= Titik Nyala
<i>Soybean Oil</i>	= Minyak Kedelai
<i>Pour Point</i>	= Titik Tuang
<i>Silicone Dioxide</i>	= Silikon Dioksida

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator daya merupakan komponen utama dalam sistem kelistrikan [1]. Kegagalan pada transformator daya dapat menimbulkan gangguan dalam sistem transmisi, dan distribusi penyediaan energi listrik. Salah satu komponen utama dari transformator daya adalah sistem isolasi. Material isolasi pada transformator daya terdiri dari tiga jenis, yaitu jenis isolasi padat, cair, dan gas [2]. Isolasi cair seperti minyak mineral tidak hanya berfungsi sebagai isolator, tetapi juga membantu dalam menyerap panas. Minyak mineral merupakan jenis isolasi cair yang paling umum digunakan dalam transformator daya dan merupakan turunan dari minyak bumi yang telah dimodifikasi untuk meningkatkan sifat isolasi dan kemampuan pendinginannya [3].

Minyak mineral adalah cairan dielektrik yang paling umum digunakan dalam transformator saat ini. Salah satu sifat utamanya adalah memberikan sifat pendinginan yang sangat baik serta keunggulan dalam memadamkan busur Listrik. Namun, dalam aplikasi ini, minyak mineral juga memiliki 2 kelemahan yaitu tidak stabil secara kimia dan oleh karena itu merupakan potensi bahaya kebakaran, serta tidak ramah lingkungan[4].

Dalam praktiknya, minyak transformator pasti tercampur dengan polutan seperti logam, selulosa, dan karbon. Konsentrasi polutan selulosa dapat mencapai 90%. Partikel selulosa dalam minyak akan terpolarisasi dalam medan listrik dan membentuk jembatan selulosa melintasi dua elektroda, yang pada akhirnya memicu loncatan pada dielektrik cair [5]. Partikel seperti selulosa memiliki kadar air tertentu, sehingga jika dibiarkan pada suhu tinggi dalam waktu yang lama, partikel tersebut akan menguap dan

menghasilkan gelembung gas. Akibatnya, tegangan peluahan akan menurun jika terdapat lebih banyak selulosa karena gelembung gas akan mengandung lebih banyak air. Ketika selulosa masuk ke dalam minyak transformator maka menyebabkan kelembaban. Jika ada reaksi kimia antara partikel selulosa dan kontaminan tertentu, seperti oksigen dapat menyebabkan pelepasan gas yang berpotensi merusak isolasi atau minyak trafo. Gas-gas ini juga dapat menyebabkan pembentukan gelembung gas di dalam minyak isolasi, yang dapat mengganggu kinerja pendinginan trafo [6].

Salah satu penelitian yang telah dilakukan untuk memperbaiki dampak buruk dari penggunaan minyak mineral saat ini ialah dengan penggunaan ester alami dan sintesis yang telah dimodifikasi untuk dapat terurai secara hayati, meningkatkan titik nyala api dan meningkatkan permittivitas [7].

Salah satu ester alami yaitu minyak kedelai, minyak kedelai cenderung lebih mudah terurai oleh mikroorganisme, minyak kedelai lebih ramah lingkungan daripada minyak mineral. Ini mengurangi dampak lingkungan ketika terjadi kebocoran atau pembuangan minyak. Meskipun memiliki beberapa tantangan terkait dengan penuaan dan oksidasi, minyak kedelai juga dapat memiliki sifat isolasi yang baik. Ini adalah hal penting untuk minyak dielektrik yang digunakan dalam transformator [8].

Untuk memastikan parameter kinerja isolator cair, pengujian kekuatan tembus adalah salah satu prosedur terpenting yang digunakan, karena partikel asing atau kontaminan lainnya memiliki kecenderungan kuat untuk mengurangi tegangan tembus cairan isolasi secara signifikan.

1.2 Rumusan Masalah

Dampak negatif penggunaan isolasi cair berbahan mineral telah diupayakan dengan menggunakan minyak ester alami berupa minyak kedelai. Adanya kontaminan antara lain seperti selulosa telah menurunkan kemampuan isolasi minyak trafo dalam menahan stress tegangan yang berakhir dengan kegagalan isolasi cair secara total. Kegagalan ini dapat mengakibatkan perubahan sifat elektrik dan mekanis pada material isolasi, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik, yang sering disebut sebagai kekuatan breakdown, didefinisikan sebagai gradien tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh bahan dielektrik sebelum terjadi kegagalan fungsi. Bagaimana tingkat pengaruh kontaminan selulosa terhadap kekuatan tembus minyak kedelai dan mengapa penelitian ini penting ?

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik kekuatan tembus dari minyak kedelai yang dipengaruhi oleh partikel kontaminan berupa partikel selulosa dan temperatur akibat pembebanan transformator. Selain itu juga bertujuan untuk mengenal dampak berbagai jenis dan konsentrasi kontaminan, seperti partikel selulosa, terhadap karakteristik *breakdown* cairan isolasi. Penelitian ini juga menentukan pengaruh variasi temperatur pada kekuatan *breakdown* cairan uji.

1.3 Tujuan

1. Mengetahui pengaruh partikel selulosa dan temperatur terhadap sifat dielektrik minyak kedelai.
2. Mendapatkan nilai tegangan tembus dari campuran minyak yang telah ditambahkan kontaminan partikel selulosa.
3. Membandingkan kekuatan tembus sampel uji minyak kedelai murni dengan yang ditambahkan kontaminan partikel selulosa. Untuk dampak

konsentrasi kontaminan, seperti partikel selulosa, terhadap karakteristik breakdown cairan isolasi.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini dilakukan dengan memperhatikan hal berikut :

1. Pengujian melibatkan penggunaan sampel material isolator cair dimana minyak kedelai digunakan sebagai bahan isolator cair.
2. Sampel berupa cairan minyak kedelai yang digunakan untuk setiap pengujian dengan volume 350 ml. Bahan campuran berupa partikel selulosa dengan berat 0,05 g/l; 0,1 g/l; 0,2 g/l.
3. Minyak dikondisikan pada tiga kondisi suhu relatif yang berbeda yaitu 25°C, 30°C, 35°C untuk setiap konsentrasi partikel kontaminan.
4. Pengujian sampel dilakukan dengan prosedur IEC 60156.
5. Pengujian dilakukan dengan menggunakan sistem elektroda Bola-bola berdiameter 12,5 mm dengan jarak sela sebesar 2,5mm.
6. Pengujian yang dilakukan pada minyak adalah pengukuran Tegangan Tembus dibawah Tegangan Bolak Balik

1.5 Hipotesis

Kehadiran partikel atau zat asing dalam minyak ester alam dapat mengganggu struktur molekuler minyak, sehingga mempengaruhi kemampuannya untuk menahan tegangan tembus. Partikel atau zat asing ini bisa mengurangi sifat isolatif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Jayasree, U. M. Rao, I. Fofana, S. Brettschneider, E. M. R. Celis, and P. Picher, "Pre-breakdown Phenomena and Influence of Aging Byproducts in Thermally Aged Low Pour Point Ester Fluids under AC Stress," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 5, pp. 1563–1570, 2021, doi: 10.1109/TDEI.2021.009600.
- [2] B. S. H. M. S. Y. Matharage, M. A. R. M. Fernando, M. A. A. P. Bandara, G. A. Jayantha, and C. S. Kalpage, "Performance of coconut oil as an alternative transformer liquid insulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 3, pp. 887–898, 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6518958.
- [3] D. U. Bandara, J. R. S. S. Kumara, M. A. R. M. Fernando, and C. S. Kalpage, "Possibility of blending sesame oil with field aged mineral oil for transformer applications," *2017 IEEE Int. Conf. Ind. Inf. Syst. ICIIS 2017 - Proc.*, vol. 2018-Janua, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/ICIINFS.2017.8300411.
- [4] C. Cheng, M. Fu, and R. Zhuo, "% UHDNGRZQ LQ) ORZLQJ 7UDQVIRUPHU 2LO Breakdown in Flowing Transformer Oil & RQWDPLQDWHG ZLWK & HOOXORVH 3DUWLFOHV XQGHU ' & Contaminated with Cellulose Particles under DC) LHOG," pp. 1112–1116, 2023.
- [5] S. Maneerot and N. Pattanadech, "Effect of contaminant on breakdown characteristics of mineral oil and commercial natural ester," *ECTI-CON 2018 - 15th Int. Conf. Electr. Eng. Comput.*

- Telecommun. Inf. Technol.*, pp. 688–691, 2019, doi: 10.1109/ECTICon.2018.8619864.
- [6] H. Subekti, I. M. Y. Negara, D. A. Asfani, and D. Fahmi, “Effect of Cellulose Impurities on Breakdown Voltage Characteristic in Semiconductive Nanofluid,” *2023 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. Leveraging Intell. Syst. to Achieve Sustain. Dev. Goals, ISITIA 2023 - Proceeding*, pp. 780–785, 2023, doi: 10.1109/ISITIA59021.2023.10220990.
- [7] D. M. Mehta, P. Kundu, A. Chowdhury, V. K. Lakhiani, and A. S. Jhala, “A review on critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part 1,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, pp. 873–880, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005370.
- [8] F. R. A. Bukit, H. Zulkarnaen, and R. P. Sormin, “Mineral Mix and Soybean Oil Methyl Ester as an Alternative to the Transformer Insulating Oil,” *2021 5th Int. Conf. Electr. Telecommun. Comput. Eng. ELTICOM 2021 - Proc.*, pp. 174–177, 2021, doi: 10.1109/ELTICOM53303.2021.9590138.
- [9] S. Grzybowski, P. Shrestha, and L. Cao, “Electrical degradation of high voltage cable insulation energized by switching impulses,” *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 25–28, 2008, doi: 10.1109/CEIDP.2008.4772849.
- [10] A. Maruf and Y. Primadiyono, “Analisis Pengaruh Pembebanan Dan Temperatur Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga 60 Mva Unit 1 Dan 2 Di Gi 150 Kv Kalisari,” *Edu Elektr. J.*, vol. 10, no. 1,

pp. 1–10, 2021.

- [11] S. Tenbohlen and M. Koch, “Aging performance and moisture solubility of vegetable oils for power transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 2, pp. 825–830, 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2034747.
- [12] R. Seemamahannop, K. Bilyeu, Y. He, S. Kapila, V. Tumiatti, and M. Pompili, “Assessment of oxidative stability and physical properties of high oleic natural esters,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Dielectr. Liq.*, vol. 2019-June, no. Icldl, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ICDL.2019.8796627.
- [13] T. V. Oommen, “Vegetable oils for liquid-filled transformers,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 1, pp. 6–11, 2002, doi: 10.1109/57.981322.
- [14] S. Moore, K. Rapp, and R. Baldyga, “Transformer insulation dry out as a result of retrofilling with natural ester fluid,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, pp. 1–6, 2012, doi: 10.1109/TDC.2012.6281441.
- [15] P. Trnka, M. Svoboda, and M. Sirucek, “Determination of criteria values for insulation systems based on natural esters,” *ICHVE 2014 - 2014 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, 2014, doi: 10.1109/ICHVE.2014.7035478.
- [16] S. S. Kumar, M. W. Iruthayarajan, and M. Bakrutheen, “Investigations on the suitability of rice bran oil and corn oil as alternative insulating liquids for transformers,” *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 10–14, 2016, doi:

10.1002/tee.22182.

- [17] A. Rufer, *Energy Storage BT - Springer Handbook of Power Systems*. 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9938-2_16
- [18] N. Rosyidi and D. P., "Pengujian tegangan tembus pada minyak trafo," *Sinusoida*, vol. XXIII, no. 2, pp. 20–32, 2021.
- [19] M. S. N. Peek, F. W., *High-voltage engineering*, Mc Graw Hi., vol. 176, no. 6. New Delhi: Shalini Jha, 1913. doi: 10.1016/s0016-0032(13)90044-2.
- [20] B. Moosasait, W. I. Maria Siluvairaj, and R. Eswaran, "Experimental studies on the influence of benzyl benzoate on viscosity of vegetable oil based insulating liquids for power transformer," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 527–534, 2021, doi: 10.1049/smt2.12053.
- [21] M. H. A. Hamid *et al.*, "Electrical properties of palm oil and rice bran oil under AC stress for transformer application," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 11, pp. 9095–9105, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.02.049.
- [22] M. M. Ariffin, M. T. Ishak, M. H. A. Hamid, F. R. Hashim, F. R. Hashim, and R. A. Rahman, "Influence of Kraft Paper on the Ageing of Palm Oil , Corn Oil and Rice Bran Oil," *J. Kejuruter. SI 4(2)*, vol. 4, no. 2, pp. 1–8, 2021.
- [23] A. Windato, Suharyanto, T. Haryono, "Pengaruh Kadar Air terhadap Karakteristik Tegangan Tembus dan Dielektrik Isolasi Kertas-Minyak," *JNTETI*, Vol. 4, No.2, 2015.

- [24] I. Atanasova-Höhlein, “IEC 60296 (Ed. 5)–a standard for classification of mineral insulating oil on performance and not on the origin,” *Transform. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 86–91, 2021
- [25] International Electrotechnical Commission (IEC), “Iec 60156,” *61010-1 © Iec2001*, vol. 3, p. 13, 2018.
- [26] I. N. Oksa Winanta, A. A. N. Amrita, and W. G. Ariastina, “Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator,” *J. SPEKTRUM*, vol. 6, no. 3, p. 10, 2019, doi: 10.24843/spektrum.2019.v06.i03.p0.
- [27] C. Widyastuti and R. A. Wisnuaji, “Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator Di PT. PLN (Persero) Bogor,” *Elektron J. Ilm.*, vol. 11, no. 2, pp. 75–78, 2019, doi: 10.30630/eji.11.2.128.