

**SKRIPSI**

**EFEK TEMPERATUR PADA TEGANGAN TEMBUS ISOLASI  
KERTAS DIIMPREGNASI MINYAK**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**MUHAMMAD NUR FADIL**

**DO41191111**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2024**



## LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

### EFEK TEMPERATUR PADA TEGANGAN TEMBUS ISOLASI KERTAS DIIMPREGNASI MINYAK

Disusun dan diajukan oleh

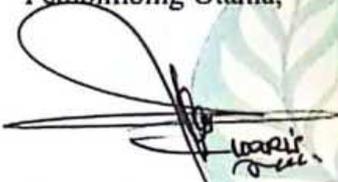
**Muhammad Nur Fadil**

**D041191111**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada Tanggal 06 Maret 2024  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Ir. Tajuddin Waris, M.T.  
NIP 196504241992031003

Pembimbing Pendamping,

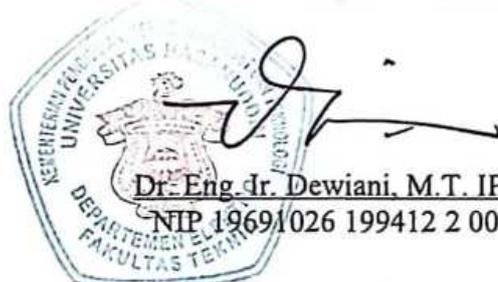


Dr. Ikhlās Kitta, S.T., M.T.  
NIP 197609142008011006

Ketua Program Studi,

Dr. Eng. dr. Dewiani, M.T. IPM  
NIP 19691026 199412 2 001



## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Nurfadil

NIM : D041191111

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

### **EFEK TEMPERATUR PDA TEGANGAN TEMBUS ISOLASI KERTAS DIIMPREGNASI**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 13 Maret 2024

Yang Menyatakan



Muhammad Nurfadil



## ABSTRAK

**MUHAMMAD NUR FADIL** *Efek Temperatur Pada Tegangan Tembus Isolasi Kertas Diimpregnasi Minyak* (dibimbing oleh Ir. Tajuddin waris, M.T. dan Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.)

Transformator memainkan peran penting dalam menyediakan pasokan listrik yang andal. Isolasi kertas dan minyak merupakan bagian integral dari struktur transformator tegangan tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak suhu dan ketebalan kertas isolasi terhadap tegangan tembus, serta memahami bagaimana perbandingan minyak nabati dengan minyak mineral mempengaruhi tegangan tembus. Penelitian dilakukan dengan menggunakan standar IEC 60156. Pengujian melibatkan kertas kraft dengan variasi suhu 30°C hingga 110°C dan ketebalan kertas 0,12 mm, 0,35 mm, dan 0,59 mm. Pengujian juga melibatkan elektroda bola-bola, jarum-bola, dan jarum-batang, dengan kertas yang direndam dalam minyak kelapa murni dan Shell Diala B. Alasan pemilihan jenis minyak Shell Diala B adalah karena umumnya digunakan pada transformator milik PLN, sementara minyak nabati jenis kelapa murni dijadikan perbandingan karena mudah didapatkan di pasaran dengan harga yang lebih murah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kertas yang direndam selama 60 menit pada minyak mengalami peningkatan nilai tegangan tembus pada elektroda bola-bola dengan ketebalan kertas 0,12 mm. Pada minyak kelapa murni, pada suhu 30°C diperoleh tegangan tembus sebesar 5,39 kV, 70°C sebesar 6,04 kV, dan 110°C sebesar 7,90 kV. Sedangkan pada minyak Shell Diala B, nilai tegangan tembus pada suhu yang sama adalah 30°C 4,13 kV, 70°C 5,48 kV, dan 110°C 6,47 kV. Selain itu, isolasi kertas pada semua ketebalan kertas dan jenis elektroda menunjukkan bahwa semakin tebal kertas maka nilai tegangan tembus akan meningkat. Jenis elektroda juga berpengaruh pada nilai tegangan tembus, dengan elektroda bola-bola cenderung memberikan nilai yang lebih tinggi. Minyak kelapa murni menunjukkan respons yang lebih besar terhadap kenaikan suhu dibandingkan dengan minyak Shell Diala B, memengaruhi tegangan tembus pada suhu yang semakin tinggi karena meningkatkan viskositas minyak. Namun, walaupun nilai tegangan tembus yang didapatkan dari minyak kelapa murni lebih tinggi daripada minyak Diala B, diperlukan penelitian lebih mendalam untuk memastikan bahwa kualitas minyak kelapa murni memenuhi standar dan persyaratan yang ditetapkan untuk digunakan dalam transformator. Penelitian ini menyoroti pentingnya pengujian tegangan tembus isolasi kertas dalam memahami karakteristik bahan isolasi. Variasi suhu, ketebalan kertas, jenis minyak isolasi, jenis elektroda, dan waktu perendaman menjadi faktor kunci yang memengaruhi kemampuan isolasi kertas terhadap tegangan tembus.



: *Transformator, Isolasi Kertas, Minyak Isolasi, Tegangan Tembus,*

## ABSTRACT

**MUHAMMAD NUR FADIL** *The Effect of Temperature on Insulation Breakdown Voltage of Oil-Impregnated Paper* (Supervised by Ir. Tajuddin Waris, M.T. and Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.)

Transformers play a vital role in providing reliable electricity supply. Kraft paper and oil insulation are integral parts of high-voltage transformer structures. This research aims to analyze the impact of temperature and insulation paper thickness on breakdown voltage, as well as to understand how the comparison between vegetable oil and mineral oil affects breakdown voltage. The research was conducted using the IEC 60156 standard. Testing involved kraft paper with temperature variations from 30°C to 110°C and paper thicknesses of 0.12 mm, 0.35 mm, and 0.59 mm. The testing also involved ball-ball electrodes, needle-ball electrodes, and needle-rod electrodes, with the paper immersed in virgin coconut oil and Shell Diala B oil. The reason for choosing Shell Diala B oil is because it is commonly used in PLN transformers, while virgin coconut oil is chosen for comparison because it is easily obtainable in the market at a lower price. The research results showed that paper immersed for 60 minutes in oil experienced an increase in breakdown voltage value with a paper thickness of 0.12 mm using ball-ball electrodes. In virgin coconut oil, at 30°C, the breakdown voltage was 5.39 kV, at 70°C it was 6.04 kV, and at 110°C it was 7.90 kV. Meanwhile, in Shell Diala B oil, the breakdown voltage values at the same temperatures were 4.13 kV, 5.48 kV, and 6.47 kV respectively. Additionally, the paper insulation at all paper thicknesses and electrode types showed that thicker paper resulted in higher breakdown voltage values. The type of electrode also influenced the breakdown voltage value, with ball-ball electrodes tending to provide higher values. Virgin coconut oil showed a greater response to temperature increase compared to Shell Diala B oil, affecting the breakdown voltage at higher temperatures due to increased oil viscosity. However, although the breakdown voltage values obtained from virgin coconut oil were higher than those from Diala B oil, further research is needed to ensure that the quality of virgin coconut oil meets the standards and requirements set for use in transformers. This research highlights the importance of breakdown voltage testing of paper insulation in understanding insulation material characteristics. Temperature variations, paper thickness, insulation oil types, electrode types, and immersion time are key factors influencing the ability of paper insulation to withstand breakdown voltage.

Keywords: *Transformer, Paper Insulation, Insulation Oil, Breakdown Voltage,*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah saya panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan pertolongan, rahmat, karunia serta hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “EFEK TEMPERATUR PADA TEGANGAN TEMBUS ISOLASI KERTAS DIIMPREGNASI MINYAK”. Dalam pembuatan skripsi ini tidak terlepas dari adanya tantangan, halangan dan rintangan yang datang silih berganti. Hari demi hari dilewati dengan perjuangan, pengorbanan, keluh kesah, kesedihan dan kebahagiaan agar skripsi ini bisa terselesaikan di waktu yang tepat untuk mendapatkan gelar sarjana. Pembuatan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan pihak lain. Dari mulai proses awal perencanaan, penelitian, serta penulisan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak dorongan semangat serta doa dari orang-orang yang ada disekitar. Pada kesempatan kali ini, izinkan saya untuk mengucapkan terimakasih kepada orang-orang yang telah membantu dalam kelancaram dan kemudahan untuk penyelesaian skripsi ini, diantaranya :

1. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan material dan moral serta doa yang tiada hentinya dan juga atas cinta, dukungan, dan pengertiannya selama proses penulisan skripsi ini. Terima kasih atas semangat dan motivasi yang diberikan untuk menyelesaikan skripsi dengan baik.
2. Dr. Eng. Ir. Dewiani, ST., MT., IPM selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Dr. Ikhlaskita, ST., M.T. selaku Dosen Pembimbing II tugas akhir ini atas bimbingan, arahan, dan masukan berharga yang diberikan sepanjang penulisan skripsi ini. Terima kasih juga atas kesabaran dan dorongan yang diberikan dalam menghadapi setiap tantangan.



ibu Hasniaty A., S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji I dan Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, ST., M.T. selaku dosen penguji II yang telah memberikan masukan dan saran dalam perbaikan tugas akhir saya.

5. Seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Teman-teman seperjuangan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan. Sahid, Jendri, Riskal, Edo, Denis, Raste, Imam, Sinta, Tasya, dan Zilpa yang selalu memberikan bantuan, doa dan saran dalam menyelesaikan tugas akhir.
7. Pengurus Himpunan Mahasiswa Elektro FT-UH Periode 2021/2022 yang telah berkolaborasi, bekerja keras, dan pantang menyerah dalam menghadapi setiap dinamika yang terjadi.
8. Seluruh teman "TR19GER" yang telah menjadi rekan seperjuangan memberikan banyak pengalaman, cerita, motivasi, dan bantuan selama perkuliahan. Terkhusus Tasya, gita, Edo, Jendri, Dwi, Fitman, dan Gabriel yang telah membantu saya menyelesaikan skripsi ini.
9. Beserta semua pihak yang tidak bisa saya tuliskan satu per satu yang telah mendukung dan membantu serta menyemangati dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Dengan segala kerendahan hati, saya menyadari bahwa tugas akhir ini jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saya mengharap kritik dan saran dari pembaca demi kesempurnaan tugas akhir ini. Saya berharap semoga karya yang sederhana ini dapat bermanfaat dengan baik untuk saya pribadi dan para pembaca.

Makassar, 2 Maret 2024

Muhammad Nur Fadil



## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK.....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>6</b>
1.1 Latar Belakang.....	6
1.2 Rumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan Penelitian .....	9
1.4 Manfaat Penelitian .....	9
1.5 Batasan Masalah .....	10
1.6 Sistematika Penulisan.....	11
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>12</b>
2.1 Transformator .....	12
2.2 Suhu Titik Panas .....	14
2.3 Pengertian Isolasi.....	14
2.4 Bahan Isolasi Cair .....	14
2.5 Jenis-Jenis Minyak Transformator.....	15
2.6 Isolasi Minyak Transformator .....	16
2.7 Syarat-syarat Minyak Sebagai Isolasi .....	18
2.8 Minyak Kelapa Murni .....	20
2.9 Teknik Pemrosesan Minyak Kelapa Murni.....	21



2.8.2 Sifat-Sifat Minyak Kelapa Murni .....	21
2.9 Bahan Padat .....	22
2.9.1 Isolasi Kertas.....	22
2.9.2 Struktur Isolasi Kertas .....	23
2.9.3 Kertas Kraft.....	24
2.10 Impregnasi Isolasi Kertas .....	24
2.11 Proses Kegagalan Isolasi Padat.....	25
2.11.1 Kegagalan Thermal.....	25
2.11.2 Kegagalan Intrinsik.....	25
2.11.3 Kegagalan Streamer .....	26
2.11.4 Kegagalan Erosi.....	26
2.11.5 Kegagalan Elektromagnetik .....	26
2.12 Penelitian Yang Terkait.....	27
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>37</b>
3.1 Lokasi Penelitian.....	37
3.2 Waktu Penelitian .....	37
3.3 Peralatan Dan Bahan Pengujian.....	37
3.4 Persiapan Material Uji.....	42
3.6 Rangkaian Pengujian.....	45
3.7 Prosedur Penelitian .....	45
3.8 Diagram Alir Penelitian .....	48
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>49</b>
4.1 Hasil Penelitian.....	49
4.1.1 Uji Pengujian Kertas Isolasi Kraf Kondisi Kering .....	50
4.1.2 Uji Pengujian Kertas Kondisi Terendam Minyak Degan waktu 60 Menit .....	58



4.4 Pengujian Kertas Kondisi Terendam Minyak Dengan Waktu 90 Menit .....	71
4.5 Pengujian Kertas Kondisi Terendam Minyak Dengan Waktu 120 Menit .....	83
4.6 Pengaruh Lama Perendaman Terhadap Tegangan Tembus .....	94
4.7 Pengaruh Ketebalan Isolasi Kertas Kraf Terhadap Tegangan Tembus .....	100
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>102</b>
5.1 Kesimpulan.....	102
5.2 Saran.....	103
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>104</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Belitan Transformator (Dzulfiqar, 2019). .....	12
Gambar 2 Struktur Kimia Senyawa Parafin Hidrokarbon (Puteri, 2018) .....	17
Gambar 3 Struktur Kimia Senyawa Napthena Hidrokarbon (Puteri, 2018) .....	17
Gambar 4 Struktur Kimia Senyawa Aromatik Hidrokarbon (Puteri, 2018).....	18
Gambar 5 Transformator Dengan Isolasi Kertas (Sukma Hardana et al., 2022)...	23
Gambar 6 Struktur Kimia Dari Selulosa (Sukma Hardana et al., 2022).....	23
Gambar 7 Isolasi Kertas Kraf (Sukma Hardana et al., 2022).....	24
Gambar 8 HV9103 Meja Kontrol.....	38
Gambar 9 HV9105 Transformator Uji.....	38
Gambar 10 HV9109 Connecting Cup.....	39
Gambar 11 HV9110 Floor Pedestal.....	39
Gambar 12 HV9121 Charging Resistor .....	39
Gambar 13 HV9108 Connecting Rod.....	40
Gambar 14 HV9141 Measuring Capasitor.....	40
Gambar 15 HV9133 Measuring Spark Gap .....	40
Gambar 16 Thicknees Gauge .....	41
Gambar 17 Oven.....	41
Gambar 18 Kertas Isolasi Kraf.....	42
Gambar 19 Minyak Isolasi Kelapa Murni Dan Minyak Shell Diala B.....	42
Gambar 20 Skematik Modul Pengujian Pembangkitan Tegangan Tinggi AC.....	45
Gambar 21 Modul Pengujian Pembangkitan Tegangan Tinggi AC.....	45
Gambar 22 Diagram Alir Penelitian .....	48
Gambar 23 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,12 mm Kondisi Kering .....	55
Gambar 24 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,35 mm Kondisi Kering .....	56
Gambar 25 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,59 mm Kondisi Kering .....	57



Gambar 26 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,12mm Perendaman 60 Menit .....	67
Gambar 27 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,35mm Perendaman 60 Menit .....	68
Gambar 28 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,59mm Perendaman 60 Menit .....	69
Gambar 29 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,12 mm Perendaman 90 Menit .....	79
Gambar 30 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,35 mm Perendaman 90 Menit .....	80
Gambar 31 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,59 mm Perendaman 90 Menit .....	81
Gambar 32 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,12 mm Perendaman 120 Menit .....	91
Gambar 33 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,35 mm Perendaman 120 Menit .....	92
Gambar 34 Diagram Perbandingan Kertas Kraf ketebalan 0,59 mm Perendaman 120 Menit .....	93
Gambar 35 Diagram Perbandingan Pengaruh Lama Perendaman Minyak Kelapa Murni Terhadap Nilai Tegangan Tembus Pada Isolasi Kertas Kraf Ketebalan 0,12 mm .....	94
Gambar 36 Diagram Perbandingan Pengaruh Lama Perendaman Minyak Shell Diala B Terhadap tegangan tembus Pada Isolasi Kertas Ketebalan 0,12 mm.....	95
Gambar 37 Diagram Perbandingan Pengaruh Lama Perendaman Minyak Kelapa Murni Terhadap tegangan tembus Pada Isolasi Kertas Ketebalan 0,35 mm.....	96
Gambar 38 Diagram Perbandingan Pengaruh Lama Perendaman Minyak Shell Diala B Terhadap tegangan tembus Pada Isolasi Kertas Ketebalan 0,35 mm.....	97
Gambar 39 Diagram Perbandingan Pengaruh Lama Perendaman Minyak Kelapa rhadap tegangan tembus Pada Isolasi Kertas Ketebalan 0,59 mm.....	98
40 Diagram Perbandingan Pengaruh Lama Perendaman Minyak Shell terhadap tegangan tembus Pada Isolasi Kertas Ketebalan 0,59 mm.....	99



Gambar 41 Diagram Perbandingan Ketebalan Kertas Terhadap Nilai Tegangan  
Tembus ..... 100



## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Kelas Bahan Isolasi Padat (Elfreda, 2018). .....	24
Tabel 2 Penelitian Terkait.....	27
Tabel 3 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Bola-Bola Kertas Isolasi Kondisi Kering .....	51
Tabel 4 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Bola Kertas Isolasi Kondisi Kering.....	52
Tabel 5 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Batang Kertas Isolasi Kondisi Kering.....	53
Tabel 6 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Bola-Bola Kertas Perendaman 60 Menit .....	59
Tabel 7 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Bola Kertas Perendaman 60 Menit Minyak Kelapa Murni.....	60
Tabel 8 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Batang Kertas Perendaman 60 Menit Minyak Kelapa Murni.....	61
Tabel 9 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Bola-Bola Kertas Perendaman 60 Menit Minyak Shell Diala B.....	62
Tabel 10 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Bola Kertas Perendaman 60 Menit Minyak Shell Diala B .....	63
Tabel 11 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Batang Kertas Perendaman 60 Menit Minyak Shell Diala B .....	64
Tabel 12 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Bola-Bola Kertas Perendaman 90 Menit Minyak Kelapa Murni.....	72
Tabel 13 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Bola Kertas Perendaman 90 Menit Minyak Kelapa Murni.....	73
Tabel 14 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Batang Kertas Perendaman 90 Menit Minyak Kelapa Murni.....	74
Tabel 15 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Bola-Bola Kertas Perendaman 90 Menit .....	75



Tabel 16 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Bola Kertas Perendaman 90 Menit Minyak Shell Diala B .....	76
Tabel 17 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Batang Kertas Perendaman 90 Menit.....	77
Tabel 18 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Bola-Bola Kertas Perendaman 120 .	84
Tabel 19 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Bola Kertas Perendaman 120 Menit Minyak Kelapa Murni.....	85
Tabel 20 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Batang Kertas Perendaman 120 Menit.....	86
Tabel 21 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Bola-Bola Kertas Perendaman 120 Menit Minyak Shell Diala B .....	87
Tabel 22 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Bola Kertas Perendaman 120 Menit Minyak Shell Diala B .....	88
Tabel 23 Nilai Tegangan Tembus Elektroda Jarum-Batang Kertas Perendaman 120 Menit Minyak Shell Diala B .....	89



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan salah satu peralatan listrik tegangan tinggi yang sering digunakan. Transformator memainkan peran penting dalam menyediakan pasokan listrik yang dapat diandalkan dan efisien. Pada transformator, terdapat dua bahan dielektrik, yaitu isolasi cair dan isolasi padat. (Nichal, 2018).

Tegangan tembus merupakan tegangan ketika isolator sudah tidak sanggup menghadapi tekanan berupa medan listrik di antara elektroda yang mempunyai beda potensial sehingga isolator berubah menjadi konduktor (Nyoman Oksa Winanta et al., 2019). Pada isolasi padat, kertas adalah salah satu bahan isolasi pertama yang digunakan dalam teknologi tegangan tinggi. Bahan dielektrik yang paling banyak digunakan adalah kertas kraft. Kertas kraft memiliki sifat isolasi yang baik dan ekonomis, tetapi juga memiliki stabilitas termal yang lebih rendah dari yang dikehendaki dan kekuatan dengan paparan jangka panjang terhadap suhu tinggi (Nichal, 2018).

Isolasi dengan bahan padat memiliki peranan yang penting dalam transformator terutama digunakan sebagai pemisah gulungan dalam transformator. Isolasi padat dalam transformator posisinya terendam dalam media transfer panas berupa isolasi berbahan cair yang berfungsi untuk mengisolasi konduktor juga sekaligus melepaskan panas yang tercipta selama transformator beroperasi (Mareta, 2022).

Impregnasi isolasi kertas merupakan suatu kejadian dimana isolasi kertas direndam dalam isolasi cair (minyak) yang bertujuan untuk menambah kekuatan dielektrik dari isolasi kertas. Perendaman tersebut sesuai dengan teori adhesi bahwa rongga dan pori-pori udara pada kertas isolasi tersebut akan tertutup dengan minyak yang telah terserap didalamnya dan isolasi kertas tersebut akan membentuk susunan yang lebih sempurna. Dalam transformator isolasi kertas merupakan bagian yang penting dimana setiap jenis kertas isolasi memiliki peran tersendiri, isolasi kertas memiliki kelebihan, yaitu isolator yang mampu menahan



tekanan mekanis maupun elektris sehingga isolator tersebut tidak dapat diremehkan dalam transformator. Dengan semakin lamanya penggunaan transformator maka kekuatan dielektrik dari isolator kertas akan semakin berkurang, maka dari itu diperlukan minyak agar menambah kekuatan dielektrik (Elfreda, 2018).

Beberapa macam faktor yang diperkirakan memengaruhi ketahanan minyak transformator seperti jarak celah pendinginan, perawatan sebelum pemakaian seperti pemeriksaan elektroda dan minyak, pengaruh kekuatan dielektrik dari minyak transformator yang diukur serta kondisi pengujian atau minyak transformator itu sendiri juga memengaruhi kekuatan dielektrik minyak transformator. Ketahanan isolasi disebabkan karena beberapa hal antara lain isolasi tersebut sudah lama dipakai, berkurangnya kekuatan dielektrik dan karena isolasi tersebut dikenakan tegangan lebih (Junaidi et al., 2008).

Pengaruh kenaikan temperatur dengan perendaman kertas isolasi ke dalam minyak isolasi akan menyebabkan pengaruh pada tegangan tembus (Dzulfiqar, 2019). Isolasi kertas adalah bagian dari sistem isolasi trafo. Fungsi isolasi kertas adalah sebagai media dielektrik yang memberikan kekuatan mekanik dan ketahanan panas (Prihantiny et al., 2022) .

Penggunaan isolasi kertas dan minyak secara luas berkaitan dengan biaya rendah, kualitas yang tinggi, proses manufaktur yang sederhana dan perawatan yang rendah. Namun, meskipun memiliki keuntungan seperti yang telah disebutkan, isolasi kertas dan minyak memiliki kekurangan yang fatal, yaitu penuaan. Dalam kondisi operasi, kertas yang diresapi minyak, sejenis isolasi minyak dan kertas yang digunakan dalam transformator daya, menurun dalam jangka panjang di bawah panas, medan listrik, kelembaban dan zat kimia (Nichal, 2018).

Minyak mineral memiliki tingkat biodegradasi yang rendah, yakni sekitar 30%. Minyak isolasi lain seperti minyak sintetis bahkan nyaris tidak dapat terbiodegradasi. Rendahnya tingkat biodegradasi minyak mineral dapat menyebabkan pencemaran lingkungan jika terjadi kebocoran tangki transformator atau minyak tersebut tumpah atau jika minyak sisa pakai dibuang. Salah satu ancaman lainnya adalah bahwa minyak mineral akan habis di masa depan,



karena minyak mineral diekstrak dari minyak bumi yang merupakan sumber tak terbarukan, Minyak nabati yang berasal dari biji tanaman pertanian dianggap sebagai kandidat yang paling tepat sebagai minyak isolasi yang ramah lingkungan. Tingkat keterbiodegradasian minyak nabati mencapai 97%, atau bahkan terbiodegradasi penuh, sehingga ramah lingkungan (Rajab et al., 2022).

Dalam studi ini, dilakukan pengujian dengan kertas isolasi yang direndam pada minyak isolasi dengan pengaruh perubahan temperatur, lapisan kertas yang berbeda terhadap tegangan tembus maka akan di dapat perbandingan untuk mengetahui karakteristik dari kertas isolasi tersebut. Melalui pengujian ini, maka akan mendapatkan hasil yang diharapkan dapat memberi manfaat untuk bisa dikembangkan lagi dan dapat menjadi pertimbangan untuk pemilihan karakteristik dalam pembuatan transformator untuk berapa jumlah lapisan kertas yang ideal dan efektif dalam jangka waktu yang lama.

Berdasarkan uraian di atas, dilakukan sebuah penelitian berjudul "Pengaruh Temperatur terhadap Tegangan Tembus pada Isolasi Kertas yang Diimpregnasi Minyak" dengan menggunakan standar IEC 60156. Penelitian ini melibatkan penggunaan elektroda bola-bola, serta pengujian elektroda jarum-bola. Pengujian dilaksanakan pada suhu operasional antara 30°C hingga 110°C, dengan variasi ketebalan kertas isolasi yang berbeda. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji tegangan tembus dengan pengaruh kenaikan temperatur, variasi ketebalan kertas isolasi, dan jenis minyak isolasi yang berbeda.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan tersebut dalam beberapa poin sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh kenaikan suhu terhadap isolasi kertas kraf terhadap tegangan tembus.



2. Bagaimana pengaruh isolasi kertas kraf dalam kondisi kering terhadap tegangan tembus.

3. Apa hubungan antara variasi ketebalan kertas isolasi dengan tingkat tegangan tembus yang dihasilkan.
4. Bagaimana pengaruh kertas isolasi yang diimpregnasi jenis minyak berbeda terhadap tegangan tembus.
5. Apa dampak dari variasi elektroda terhadap tegangan tembus kertas isolasi yang berada dalam kondisi kering, direndam dalam minyak, serta dengan variasi ketebalan yang berbeda.

### 1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui pengaruh kenaikan suhu terhadap isolasi kertas kraf terhadap tegangan tembus.
2. Menganalisis pengaruh isolasi kertas kraf dalam kondisi kering terhadap tegangan tembus..
3. Menganalisis hubungan antara variasi ketebalan kertas isolasi dengan tingkat tegangan tembus yang dihasilkan.
4. Untuk memahami pengaruh berbagai jenis minyak terhadap kertas isolasi terhadap tegangan tembus. Serta menganalisis pengaruh lama perendaman isolasi kertas kraft terhadap tegangan tembus.
5. Menginvestigasi pengaruh variasi elektroda terhadap tegangan tembus kertas isolasi yang berada dalam kondisi kering, direndam dalam minyak, serta dengan variasi ketebalan yang berbeda.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari adanya penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana kenaikan suhu memengaruhi isolasi kertas kraf, yang dapat diterapkan dalam pengembangan material isolasi yang lebih efisien dan tahan terhadap perubahan suhu.



2. Penelitian ini akan memberikan gambaran yang lebih jelas tentang bagaimana tegangan tembus memengaruhi kemampuan isolasi kertas dalam kondisi kering.
3. Dengan memahami pengaruh ketebalan kertas isolasi terhadap tegangan tembus, skripsi ini akan memberikan pandangan yang lebih terperinci tentang bagaimana ketebalan tersebut dapat memengaruhi kinerja isolasi dalam sistem listrik.
4. memberikan wawasan tentang bagaimana berbagai jenis minyak memengaruhi kertas isolasi yang diimpregnasikan minyak pada tegangan tembus. Dengan memahami pengaruh lama perendaman isolasi kertas kraft, penelitian ini dapat membantu dalam menentukan waktu perendaman yang optimal untuk mencapai kinerja isolasi yang maksimal.
5. Melalui analisis variasi elektroda terhadap tegangan tembus pada kertas isolasi dalam berbagai kondisi, skripsi ini akan memberikan pemahaman tentang bagaimana desain elektroda dapat memengaruhi performa isolasi, baik dalam kondisi kering, direndam dalam minyak, maupun dengan ketebalan yang berbeda.

### 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang dimaksud ditujukan agar menghindari penyimpangan maupun pelebaran pokok penelitian. Beberapa batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis pengujian adalah tegangan tembus pada isolasi kertas dengan media perendaman pada minyak.
2. Pengujian dilakukan dengan mengubah temperatur dan ketebalan kertas.
3. Isolasi kertas yang diuji adalah kertas kraft.
4. Ketebalan kertas yang digunakan yaitu 0.12 mm, 0.35 mm, 0,59 mm.

temperatur yang digunakan 30 °C sampai dengan 110 °C , dengan penambahan temperatur 40°C setiap sampel.



6. Minyak yang digunakan untuk impregnasi adalah minyak trafo dan minyak nabati.
7. Pengujian dilakukan dengan menggunakan tegangan AC.
8. Pengujian dilakukan tidak dalam kondisi sempurna serta tekanan udara dan kelembapan tidak dapat disesuaikan, karena keterbatasan alat uji.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari penelitian ini yaitu :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini berisi teori-teori yang mendukung penelitian yang diperoleh dari sumber yang relevan dengan penelitian ini.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini berisi tentang lokasi penelitian, waktu penelitian, alat dan bahan, variabel penelitian, prosedur penelitian, dan diagram alir penelitian.

### **BAB IV Hasil Penelitian**

Pada bab ini berisi Analisis Dampak Kenaikan Suhu terhadap Kualitas Isolasi Kertas, Hubungan Variasi Ketebalan Kertas Isolasi dengan Tegangan Tembus, Pengaruh Jenis Minyak terhadap Kertas Isolasi pada Tegangan Tembus, dan Investigasi Variasi Elektroda terhadap Tegangan Tembus.

### **BAB V Kesimpulan Dan saran**

Pada bab terakhir ini berisi ringkasan penelitian, implikasi dan saran.

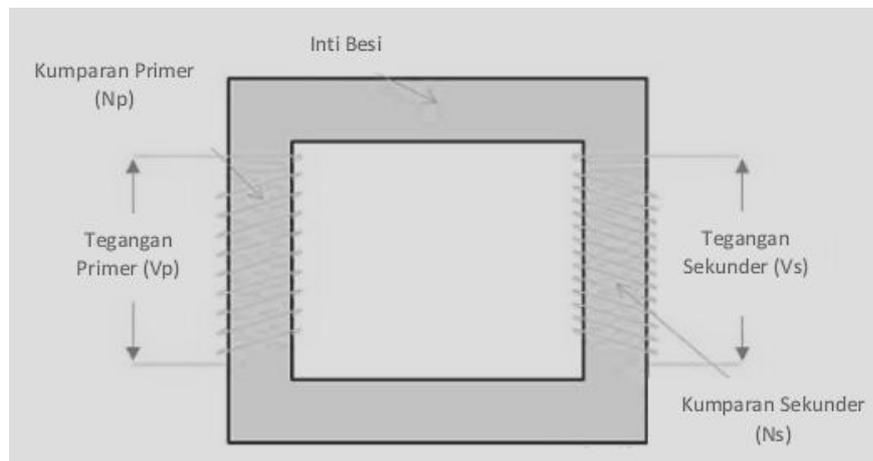


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Transformator

Transformator memiliki prinsip hukum induksi Faraday. Jika suatu gaya listrik melalui garis lengkung yang tertutup, akan berbanding lurus dengan perubahan persatuan waktu dari pada arus induksi atau fluks yang dilingkari oleh garis lengkung itu. Selain hukum Faraday, transformator menggunakan hukum Lorenz. Pada transformator terdapat suatu inti besi yang dikelilingi aliran arus listrik bolak-balik, kemudian inti besi akan berubah menjadi magnet dan akan terjadi beda tegangan pada kedua ujung belitan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan. Prinsip kerja transformator adalah mentransfer atau mengirim daya dari satu sisi ke sisi lainnya. Ini dicapai dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Prinsip ini melibatkan lilitan pada sisi primer yang menghasilkan medan magnet, yang kemudian diinduksi pada lilitan sisi lainnya. Transformator terhubung pada kedua sisinya untuk menjalankan proses ini. (Wuwung, 2010).



Gambar 1 Belitan Transformator (Dzulfiqar, 2019).



umus perbandingan tegangan dan lilitan pada primer dan sekunder ator adalah sebagai berikut:

$$v/V_s = N_p/N_s \quad (1)$$

Keterangan:

$V_p$  : tegangan pada sisi kumparan primer

$V_s$  : tegangan pada sisi sekunder

$N_p$  : banyaknya jumlah lilitan pada kumparan primer

$N_s$  : banyaknya jumlah lilitan pada kumparan sekunder

Tegangan dan jumlah kumparan akan berbanding lurus, karena semakin besar tegangan maka akan semakin banyak pula jumlah belitan yang diperlukan. Namun tegangan akan berbanding terbalik dengan arus, sehingga semakin besar tegangan akan memiliki arus yang kecil, begitu pula sebaliknya dengan rumus transformator sebagai berikut:

$$S_{in} = S_{out}, \text{ dimana: } S = VI \quad (2)$$

Keterangan:

$S_{in}$  = kapasitas/daya masukan transformator

$S_{out}$  = kapasitas/daya keluaran transformator

$V$  = tegangan nominal transformator

$I$  = arus melalui transformator

Kerugian tanpa beban dan berbeban adalah dua sumber penting dari pemanasan yang dipertimbangkan dalam pemodelan termal transformator daya. Rugi yang timbul saat transformator diberikan energi tanpa beban adalah rugi eddy dan rugi Hysterisis dalam inti. Rugi Hysterisis disebabkan oleh material magnet dasar yang menyelaraskan dengan medan magnet bolak-balik. Arus eddy diinduksikan dalam inti oleh medan magnet bolak-balik. Jumlah rugi Hysterisis dan rugi arus eddy tergantung pada tegangan yang dibangkitkan dari transformator. Kerugian beban adalah sumber yang lebih signifikan dari pemanasan transformator, yang terdiri dari kerugian tembaga akibat hambatan belitan dan rugi beban tersesat karena arus eddy di bagian structural lainnya dalam transformator. Kerugian tembaga terdiri dari kerugian resistansi DC, dan kerugian arus eddy belitan. Jumlah kerugian yang terjadi tergantung pada arus beban transformator, serta suhu minyak.

alnya kerugian resistansi DC akan meningkatkan suhu, sementara pembebanan lainnya menurun dengan peningkatan suhu minyak (S, 2010).



## 2.2 Suhu Titik Panas

Suhu titik-panas adalah suhu terpanas di dalam belitan transformator. Lokasi belitan terpanas adalah tergantung pada desain fisik transformator. Panduan untuk Pembebanan menetapkan batas desain untuk suhu titik-panas normal  $110^{\circ}\text{C}$ , atau  $80^{\circ}\text{C}$  diatas suhu lingkungan yang diasumsikan sebesar  $30^{\circ}\text{C}$  (Standard IEEE, 1999). Untuk situasi beban lebih darurat, Panduan untuk Pembebanan mengizinkan suhu titik panas tidak melebihi  $110^{\circ}\text{C}$  (Standard IEEE, 1999). Karena suhu yang berlebihan dapat menyebabkan kerugian yang tidak bisa diterima dari umur isolasi. Isolasi minyak memiliki peranan penting dalam sistem isolasi transformator dan juga berfungsi sebagai pendingin antara kumparan kawat atau inti besi dengan sirip pendingin. Adapun beberapa tugas utama pada isolasi minyak, yaitu sebagai media isolator, media pendingin untuk memadamkan busur api dan media pelindung terhadap proses oksidasi yang mampu menyebabkan korosif pada peralatan logam (Wuwung, 2010).

## 2.3 Pengertian Isolasi

Isolasi adalah suatu bahan yang tidak dapat menghantar aliran listrik, bersifat memisahkan bagian yang bertegangan satu dengan bagian bertegangan lainnya agar tidak terjadi kebocoran pada suatu peralatan tegangan tinggi. Fungsi lainnya, isolasi sebagai pelindung dengan tujuan melindungi bagian yang bertegangan agar manusia yang berada disekitar peralatan atau penghantar tidak tersengat listrik. Penggunaan bahan/materal isolasi pada tegangan tinggi terbagi atas tiga bahan utama yaitu isolasi cair, isolasi gas/udara dan isolasi padat (Mika et al., 2009).

## 2.4 Bahan Isolasi Cair



Salah satu jenis bahan isolasi yang sering digunakan adalah bahan isolasi cair. Bahan isolasi cair dapat mengisi seluruh volume bahan yang diisolasi dan secara simultan akan menahan panas secara merata atau menyeluruh. Media ini memiliki efisiensi yang lebih baik dari pada udara atau nitrogen dalam

kemampuan menahan panas saat digunakan transformator. Isolasi zat cair merupakan campuran dari hidrokarbon. Saat digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik, isolasi cair harus terbebas dari uap air hasil oksidasi karena akan berdampak pada kualitas dari isolasi cair tersebut. Faktor penting yang berdampak pada kekuatan dielektrik dari isolasi cair adalah keberadaan kontaminan yang ditimbulkan akibat tercampur dengan partikel-partikel yang lain. Keberadaan kontaminan pada isolasi cair dapat menurunkan kekuatan dielektriknya, karena medan listrik yang bergerak dari anoda ke katoda akan melewati partikel-partikel kontaminan tersebut (Heri & Syakur, 2023).

## 2.5 Jenis-Jenis Minyak Transformator

Jenis-jenis minyak yang dapat digunakan untuk bahan isolasi terdiri dari (Basuki et al., 2015).

### A. Minyak isolasi mineral

Minyak isolasi mineral diketahui berisi berbagai jenis molekul dan secara luas dapat digolongkan kedalam jenis yang mengandung *paraffin* dengan rumus kimianya  $C_nH_{2n+2}$ , *naphthenic* ( $C_nH_{2n}$ ), *aromatis* ( $C_nH_n$ ) atau kelompok molekul tingkat menengah lainnya..

### B. Minyak Isolasi Sintesis

Minyak jenis ini merupakan hasil pengembangan pada bidang industri kimia. Kelebihan utamanya adalah bersifat tidak mudah terbakar. Contoh minyak sintetis diantaranya adalah askarel dan silikon.

### C. Minyak Isolasi Dari Bahan Olahan Nabati

Kelompok minyak organik meliputi minyak sayur, minyak damar, dan ester. Jenis minyak ini mulai banyak dipakai sebagai bahan isolasi pada akhir abad ke-19, terlebih dengan semakin menipisnya cadangan mineral tak terbarukan dan masih kecilnya pemakaian minyak sintetis membuat minyak organik mendapatkan perhatian lebih.



## 2.6 Isolasi Minyak Transformator

Minyak transformator adalah minyak mineral yang diperoleh dengan pemurnian minyak mentah. Sebagai bahan isolasi, minyak transformator harus mempunyai tegangan tembus yang tinggi. Selain itu minyak ini berfungsi sebagai media pendingin yaitu untuk mengantisipasi kenaikan temperatur (suhu) pada transformator, adanya kenaikan temperatur yang terlalu tinggi bisa merusak isolasi kertas pada gulungan dalam transformator, dan suhu yang terlalu panas sehingga dapat menurunkan tahanan isolasi yang dapat mengakibatkan hubung singkat antara fasa dengan fasa dan fasa dengan bagian dalam transformator sehingga dapat menimbulkan kerusakan pada transformator. Sedangkan fungsi minyak sebagai media isolasi adalah merupakan sesuatu yang mutlak untuk menghindari terjadinya hubung singkat di dalam transformator baik antara fasa maupun sisi fasa dengan rangka, dimana hubung singkat tersebut akan mengakibatkan transformator meledak (Jumardin et al., 2019).

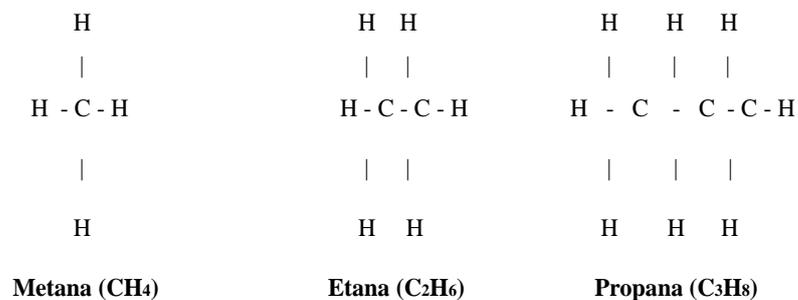
minyak transformator terbuat dari bahan kimia organik, merupakan senyawa atom-atom C dan H. Bahan dasar pembuatan minyak transformator berasal dari minyak mentah. Untuk mendapatkan kualitas dielektrik yang baik maka pabrik-pabrik pembuat minyak transformator menambahkan zat-zat tertentu pada bahan tersebut. Secara umum pembuatan transformator dimulai dari minyak mentah sampai didapat unsur yang mempunyai sifat sebagai bahan isolasi. Minyak mentah yang ditambah masih bercampur dengan air, gas dan unsur-unsur lainnya. Kandungan gas tersebut akan dibuang melalui pipa tertentu dengan jarak yang cukup aman pada pabrik pengolahannya. Sedangkan lumpur dan air tadi masih mengandung bahan padat yaitu tanah liat, pasir dan unsur-unsur lain, yang mana pemisahannya dilakukan di sekitar pemboran. Selanjutnya cairan ini disalurkan ke kilang-kilang untuk disuling dengan bahan yang dibutuhkan. Selanjutnya proses penyulingan juga akan berbeda sebagai produksi utama yang akan dihasilkan.



ifikasi hidrokarbon yang diperoleh dari minyak mentah ini dapat dibagi a tingkatan yaitu (Puteri, 2018):

*arafin* Yang dimana rumus kimianya adalah  $C_nH_{2n+2}$ .

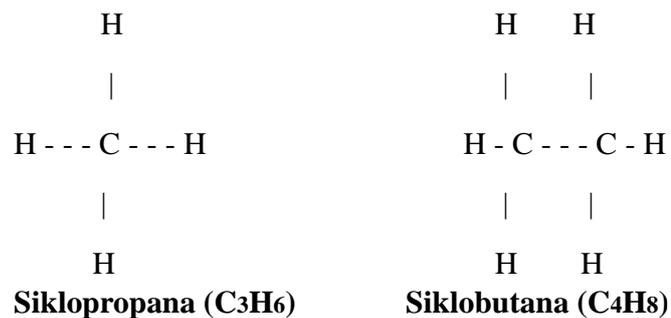
*Parafin* adalah senyawa hidrokarbon jenuh yang mempunyai rantai karbon lurus atau bercabang, yang dalam kimia organik dikenal sebagai senyawa dengan rantai terbuka atau senyawa alifatis. Senyawa alifatis terbagi menjadi 3 bagian yaitu alkana, alkena dan alkuna.



Gambar 2 Struktur Kimia Senyawa Parafin Hidrokarbon (Puteri, 2018)

## 2) Naphtena, dengan rumus C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>.

Senyawa naphtena digolongkan sebagai senyawa hidrokarbon yang mempunyai rantai tertutup atau struktur berbentuk cincin. Senyawa ini dikenal pula sebagai senyawa alisiklik. Masing-masing cincin dapat berisi lima atau enam atom karbon. Senyawa naphtena dapat berupa monosiklik, disiklik, dan seterusnya tergantung pada jumlah cincin yang dimilikinya. Pada masing-masing cincin dapat pula terhubung.



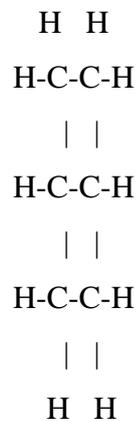
Gambar 3 Struktur Kimia Senyawa Naphtena Hidrokarbon (Puteri, 2018)

## 3) Aromatik



Yang dimana rumus kiamanya adalah C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>. Senyawa ini memiliki tu atau lebih cincin aromatik yang dapat bergabung dengan cincin isiklik. Beberapa senyawa aromatik berfungsi sebagai menghambat

oksidasi (inhibitor) dan penjaga kestabilan, tetapi jika jumlahnya terlalu banyak akan bersifat merugikan yaitu berkurangnya kekuatan dielektrik, serta berkurangnya sifat pelarutan minyak terhadap isolasi padat didalamnya. Ketiga hidrokarbon diatas memiliki fungsi yang berbeda pada minyak mentah. Minyak isolasi transformator merupakan minyak mineral yang antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda.



Gambar 4 Struktur Kimia Senyawa Aromatik Hidrokarbon (Puteri, 2018)

## 2.7 Persyaratan Minyak Sebagai Isolasi

Menurut SPLN 49 – 1 (1982), minyak isolasi harus memiliki beberapa syarat yaitu :

a. Kejernihan (*Appearance*)

Minyak isolasi tidak boleh mengandung suspensi atau endapan (sedimen).

b. Massa Jenis (*Density*)

Massa jenis dibatasi agar air dapat terpisah dari minyak isolasi dan tidak melayang. Hal ini sangat membantu dalam mempertahankan homogenitas minyak isolasi.



Viskositas Kinematik (*Kinematic Viscosity*)

Viskositas memegang peranan dalam pendinginan, dipergunakan untuk menentukan kelas minyak dan kurang dipengaruhi oleh kontaminasi atau kerusakan minyak.

d. Titik Nyala (*Flash Point*)

Temperatur ini adalah temperatur campuran antara uap dari minyak dan udara yang akan meledak (terbakar) bila didekati dengan bunga api kecil. Titik nyala yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi zat yang mudah terbakar.

e. Titik Tuang (*Pour Point*)

Titik tuang dipakai untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang akan menggunakan minyak isolasi.

f. Angka Kenetralan (*Neutralization Number*)

Angka kenetralan merupakan angka yang menunjukkan penyusun asam minyak isolasi dan dapat mendeteksi kontaminasi minyak, menunjukkan kecenderungan perubahan kimia atau cacat atau indikasi perubahan kimia dalam bahan tambahan (additive). Angka kenetralan dapat dipakai sebagai petunjuk umum untuk menentukan apakah minyak sudah harus diganti atau diolah.

g. Korosi Belerang (*Corosive Sulphur*)

Pengujian ini menunjukkan kemungkinan korosi yang dihasilkan dari adanya belerang bebas atau senyawa belerang yang tidak stabil dalam minyak isolasi.

h. Tegangan Tembus (*Breakdwon Voltage*)

Tegangan tembus yang terlalu rendah menunjukkan adanya kontaminasi seperti air, kotoran atau partikel konduktif dalam minyak.

Faktor Kebocoran Dielektrik (*Dielectric Dissipation*)

Harga yang tinggi dari faktor ini menunjukkan adanya kontaminasi atau hasil kerusakan misalnya air, hasil oksidasi, logam alkali, koloid bermuatan dan sebagainya.



j. Kandungan Air (*Water Content*)

Adanya air dalam minyak isolasi akan menurunkan tegangan tembus dan tahanan jenis minyak isolasi dan juga adanya air akan mempercepat kerusakan kertas pengisolasi (insulating paper).

k. Tahanan Jenis (*Resistivity*)

Tahan jenis yang rendah menunjukkan terjadinya kontaminasi yang bersifat konduktif.

l. Tegangan Permukaan (*Interfacial Tension*)

Adanya kontaminasi dengan zat yang terlarut (soluble contamination) atau hasil-hasil kerusakan minyak, umumnya menurunkan nilai tegangan permukaan. Penurunan tegangan permukaan juga menurunkan indikator yang peka bagi awal kerusakan minyak.

m. Kandungan Gas (*Gas Content*)

Adanya gas terlarut dan gas bebas dalam minyak isolasi dapat digunakan untuk mengetahui kondisi transformator dalam operasi. Adanya gas seperti hidrogen ( $H_2$ ), metana ( $CH_4$ ), etana ( $C_2H_6$ ), etilen ( $C_2H_4$ ) dan asetilin ( $C_2H_2$ ) menunjukkan terjadinya dekomposisi minyak isolasi pada kondisi operasi, sedangkan adanya karbondioksida ( $CO_2$ ) dan karbon monoksida ( $CO$ ) menunjukkan kerusakan pada bahan isolasi.

## 2.8 Minyak Kelapa Murni

Proses pengolahan daging buah kelapa menjadi produk minyak kelapa murni atau sering disebut Minyak kelapa murni dapat memanfaatkan teknologi yang sederhana karena proses pembuatannya yang relatif sederhana, tanpa penggunaan bahan pengawet (zat kimia) dan tanpa proses pemanasan atau dengan pemanasan pada suhu rendah (Salnus et al., 2021). Minyak kelapa murni diperoleh dari ekstraksi daging kelapa yang tidak melalui proses tambahan sehingga

akan minyak kelapa dalam keadaan murni. Minyak kelapa murni ini memiliki stabilitas tinggi dan tahan terhadap oksidasi akibat paparan hama, cahaya, air, dan oksigen (Budiyantoro et al., 2011).



### 2.8.1 Teknik Pemrosesan Minyak Kelapa Murni

#### 1. Teknik Pengolahan Dengan Pemanasan.

Pengolahan dengan pemanasan merupakan cara tradisional yang sudah lama dilakukan dalam mengolah kelapa menjadi minyak. Hanya saja untuk mendapatkan minyak kelapa murni perlu sedikit perbaikan yaitu dengan pemanasan bertahap yang meliputi pemanasan krim santan dan pemanasan minyak.

#### 2. Teknik Pengolahan Tanpa Pemanasan

Tahapan pembuatan minyak kelapa murni menggunakan metode tanpa pemanasan diawali dengan proses pembuatan santan. Pembuatan santan ini sama dengan proses dengan pemanasan. Hanya saja untuk mendapatkan santan digunakan perbandingan 1 kg kelapa parut dan 4-6 liter air. Proses selanjutnya adalah mendiamkan santan selama 2 jam di ember plastik transparan. Krim yang diperoleh dicampur dengan minyak pancing. Perbandingannya adalah 3 bagian krim dan 1 bagian minyak pancing. Campuran ini diaduk merata, lalu difermentasi selama 10-12 jam. Setelah difermentasi, campuran tersebut terpisah menjadi 3 lapisan, yaitu lapisan atas berupa minyak kelapa murni, lapisan tengah berupa blondo (warna putih), dan lapisan bawah berupa air. Lapisan minyak paling ataslah yang diambil secara perlahan jangan sampai tercampur dengan lapisan di bawahnya. Minyak yang diperoleh tersebut dapat digunakan sebagai 3 minyak pancing untuk proses pengolahan krim berikutnya. Minyak yang didapat belum bening, maka perlu disaring dengan kertas saring dengan diberi batu zeolit di atasnya. batu eolit ini berfungsi untuk menyerap asam lemak bebas yang masih terdapat dalam minyak.

### 2.8.2 Sifat-Sifat Minyak Kelapa Murni



Sifat-sifat minyak kelapa murni terdiri atas 90% asam lemak jenuh dan 10% asam lemak tak jenuh. Asam lemak jenuh sebagian besar merupakan asam laurat. Asam laurat ini adalah asam lemak yang banyak terkandung dalam minyak kelapa juga sering disebut minyak laurat. Asam laurat ini

merupakan salah satu senyawa rantai karbon pendek. Adapun komponen asam lemak jenuh adalah asam laurat 44- 52%, asam miristat 13-19%, asam palmitat 7,5-10,5%, asam kaprilat 5,5-9,5%, asam stearat 1,0-3,0%. Sementara asam lemak tak jenuh hanya terdiri dari asam oleat (omega 9) 5,0-8,0%, asam linoleat (omega 6) 1,5-2,5% dan asam palmitoleat 1,3 %. Dibandingkan dengan minyak nabati lainnya seperti minyak sawit, minyak kedelai, minyak jagung, dan minyak bunga matahari, minyak kelapa murni memiliki beberapa keunggulan, yaitu kandungan asam lemak jenuhnya tinggi, komposisi lemak rantai mediumnya tinggi, dan berat molekulnya rendah (Budiyantoro et al., 2011).

## 2.9 Bahan Padat

Bahan isolasi padat digunakan pada segala macam rangkaian dan peralatan listrik untuk memisahkan satu konduktor dengan yang lainnya saat dioperasikan pada tegangan yang berbeda. Suatu bahan isolasi yang baik haruslah memiliki kerugian dielektrik yang rendah, kekuatan mekanik yang baik, bebas dari gas dan uap air dalam bahan isolasi, tahan terhadap panas dan kimia. Isolasi padat biasanya digunakan pada sistem yang terletak di luar dan mempunyai space yang luas. Aplikasi isolator padat diantaranya isolator pada tiang-tiang jaringan distribusi dan transmisi, isolator pada trafo sebagai pemisah bagian bertegangan dengan tangki trafo (Heri & Syakur, 2023).

### 2.9.1 Isolasi Kertas

Isolasi kertas sendiri berfungsi sebagai pembungkus, isolasi, dan partisi. Isolasi kertas digunakan untuk mengisolasi satu lilitan dalam satu elemen kumparan atau biasa disebut sebagai isolasi antar lilitan. Isolasi ini melekat dan tidak mengubah intensitas medan elektrik di sekelilingnya. Isolasi kertas juga digunakan sebagai isolasi antar fasa, yaitu isolasi antar kumparan tegangan tinggi dengan



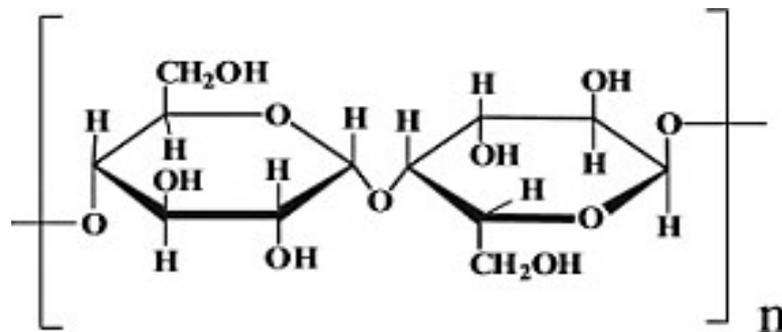
tegangan tinggi lain pada transformator tiga fasa. Pada saat transformator ini dalam jangka panjang, isolasi kertas akan mengalami penuaan umur mas. (Sukma Hardana et al., 2022).



Gambar 5 Transformator Dengan Isolasi Kertas (Sukma Hardana et al., 2022)

### 2.9.2 Struktur Isolasi Kertas

Kertas isolasi terbuat dari bahan utama selulosa, kertas untuk dielektrik diproses dari *pulp* kayu kraft, kayu lunak atau kayu pinus. Isolasi kertas terdiri dari 90% *selulosa*, 6-7% *hemi-selulosa*, 3-4% *lignin*. Pada keadaan kering kertas kraft terdiri dari 40-50% *selulose*, 10-30 *hemi-selulosa* dan 20-30% *lignin*. *Selulosa* mempunyai rumus kimia  $C_6H_{10}O_5$  yang merupakan polimer yang mengikat molekul glukosa. Pada pembentukan kertas, kandungan air dapat mencapai 98%, dengan proses selanjutnya yaitu proses pengeringan supaya kandungan air sekitar 5%. Dielektrik pada kertas tergantung dari minyak yang direndamkan dan selulosa bahan kertasnya. Perendaman kertas menggunakan minyak akan mengurangi kelembapan dan tertutupnya pori – pori pada kertas oleh minyak sehingga sifat dielektriknya semakin kuat dan lebih baik. (Sukma Hardana et al., 2022).



Gambar 6 Struktur Kimia Dari Selulosa (Sukma Hardana et al., 2022).



### 2.9.3 Kertas Kraft

Kertas kraft dibuat dari pulp kayu lunak yang tidak diputihkan oleh proses sulfat. Hasil proses akan menghasilkan kertas yang sedikit basa karena adanya kandungan sulfat. Proses memproduksi kertas sesuai dengan pabriknya. Kualitas dan keandalan kertas tergantung pada jenis proses pembuatan. Prosedur umum dimulai dengan pembuatan bubur kayu dari serat kering. Selanjutnya, sejumlah besar air dicampur dengan bubur kayu pulp untuk menghilangkan residu kimia dan prosedur ini dikenal sebagai proses repulping. Pemurnian dilakukan dengan menghancurkan serat dalam keadaan basah yang akan menghasilkan ikatan hydrogen diantara molekul selulosa. (Sukma Hardana et al., 2022).



Gambar 7 Isolasi Kertas Kraf (Sukma Hardana et al., 2022)

### 2.10 Impregnasi Isolasi Kertas

Tabel 1 Kelas Bahan Isolasi Padat (Elfreda, 2018).

Kelas	Kemampuan Menahan Suhu	Bahan
Y	90°	Sutra, katun, kertas, kayu tanpa impregnasi
A	105°	Bahan isolasi kertas Y yang diisolasi dengan resin/minyak.
	120°	Enamel resin, katun, kertas dengan formaldehyde.
	130°	Mika, fiberglass, asbes dengan pengikat yang sesuai.
	155°	Bahan dari kelas B dengan pengikat yang lebih baik.



H	180°	Fiberglass, asbes dengan pengikat silicon
C	240°	Mika, keramik, kaca dengan pengikat yang mempunyai kualitas sangat baik

## 2.11 Proses Kegagalan Isolasi Padat

Dari semua jenis bahan isolasi yang ada, isolasi padat adalah bahan yang paling bagus dalam menahan tekanan listrik. Isolasi yang baik adalah pada saat bahan tersebut mampu menahan tekanan listrik pada permukaan, salah satu cara untuk membuat kekuatan dielektrik isolasi kertas bertambah adalah dengan cara merendamnya di dalam minyak, karena dengan demikian terjadi suatu proses adhesi pada rongga-rongga isolasi kertas. Banyak faktor yang dapat menyebabkan kegagalan dalam masalah kelistrikan, seperti kejadian alam maupun kesalahan pengguna. Ketika suatu bahan isolasi sudah tembus oleh arus listrik maka itu adalah salah satu faktor kegagalan dari kelistrikan. Isolasi jenis padat seperti isolasi kertas, apabila telah atau pernah terjadi arus bocor pada isolasi, isolasi padat tidak dapat diperbaiki kembali, sifat ini disebut non-self restoring yang ada pada isolasi cair (Mika et al., 2009).

### 2.11.1 Kegagalan Thermal

Kegagalan thermal sebuah peralatan akan terjadi apabila rugi panas konduktor yang terbentuk karena arus lebih yang disalurkan pada dielektrikum dan rugi daya yang terbentuk pada dielektrikum itu sendiri tidak dapat disalurkan pada lingkungan sekitar melalui konduktansi, hal ini akan menyebabkan peningkatan temperatur tak terbatas pada bahan isolasi (Mika et al., 2009).

### 2.11.2 Kegagalan Intrinsik

Kegagalan intrinsik adalah kegagalan yang disebabkan oleh jenis dan suhu dengan menghilangkan pengaruh luar seperti tekanan, bahan elektroda, umur. Kegagalan intrinsik terjadi jika diterapkan tegangan tinggi pada elektrik yang tipis. Hal ini terjadi pada waktu yang singkat dan disebabkan



karena medan listrik yang tinggi di mana elektron mendapat energi dari tegangan luar sehingga melintasi celah yang seharusnya tidak bisa dilewati arus listrik sampai ke lapisan konduksi (Mika et al., 2009).

### 2.11.3 Kegagalan Streamer

Kegagalan ini terjadi saat elektroda ditempatkan pada permukaan bahan isolasi. Elektron dari katoda akan menembus ke anoda melewati dua medium, yaitu medium udara dan langsung melewati bahan dielektrik. Kegagalan ini terjadi lebih awal daripada kegagalan pada bahan dielektrik, karena permitivitas udara lebih kecil dari bahan elektrik (Mika et al., 2009).

### 2.11.4 Kegagalan Erosi

Sebuah bahan isolasi pasti memiliki rongga-rongga pada permukaan karena ketidak sempurnaan pada saat pembuatannya. Rongga ini berisi udara maupun benda lain, yang mempunyai kekuatan dielektrik yang berbeda dengan kekuatan dielektrik dari bahan isolasi. Akan terdapat konsentrasi medan listrik bila rongga berisi udara. Karena itu, pada nilai tegangan normal kekuatan medan pada rongga dapat bernilai lebih besar ketahanan tegangan tembus, sehingga dapat menyebabkan terjadinya kegagalan. Perbandingan dari permitivitas dan bentuk rongga menentukan kekuatan medan dalam rongga. Setiap pelepasan muatan akan menghasilkan panas yang menyebabkan rongga tersebut semakin lebar. (Mika et al., 2009).

### 2.11.5 Kegagalan Elektromagnetik

Adanya beda polaritas dari kedua elektroda yang mengapit isolasi sehingga timbul beda potensial dan tekanan listrik pada bahan isolasi tersebut mengakibatkan terjadinya kegagalan elektromagnetik. Dari tekanan listrik tersebut akan muncul mekanik yang menyebabkan elektroda yang mengapit bahan isolasi ini gaya tarik menarik seperti magnet. (Mika et al., 2009).



## 2.12 Penelitian Yang Terkait

Tabel 2 Penelitian Terkait

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Metode yang digunakan	Parameter Ukur	Kesimpulan
1.	Faishal Alim Mas'ud (2018)	Analisis Pengaruh Kenaikan Temperatur Dan Variasi Ketebalan Isolasi Kertas Yang Direndam Pada Isolasi Minyak Terhadap Breakdown Voltage	<i>Breakdown voltage</i> pada isolasi kertas dengan media perendaman pada minyak.	- Pengaruh ketebalan kertas terhadap tegangan tembus. - Kenaikan temperatur terhadap tegangan tembus.	- Semakin tebal kertas, nilai <i>breakdown voltage</i> semakin tinggi, tanpa perlu perendaman tambahan. - Peningkatan suhu menyebabkan penurunan yang berdampak pada kualitas isolasi kertas secara keseluruhan.
	nmad	Pengaruh Lama Perendaman Kertas Trafo (Pressboard)	Pengujian tegangan tembus pada kertas isolasi jenis	- Pengaruh peningkatan kadar selulosa	- Perendaman dapat menyebabkan kadar selulosa naik dan akan meningkatkan nilai tegangan tembus.



Simanjuntak (2019)	Pada Minyak Mineral, Minyak Nabati, Dan Minyak Sintetis Terhadap Karakteristik Elektrik Kertas	Pressboard yang telah direndam didalam minyak jenis minral, nabati, dan sintetis untuk setiap rentang waktu yang telah ditentukan.	terhadap tegangan tembus. - Hubungan tegangan tembus kertas pressboard setelah direndam didalam isolasi minyak jenis mineral, nabati, dan sintetis.	- Kertas pressboard mengalami variasi setelah direndam dalam berbagai jenis minyak, karakteristik tegangan tembusnya tetap konsisten. Pada minggu pertama perendaman, terjadi peningkatan nilai tegangan tembus yang mencapai 18.036 kV pada minyak mineral, 17.338 kV pada minyak nabati, dan 20.044 kV pada minyak sintetis. Namun, pada minggu kedua, nilai tegangan tembus cenderung menurun menjadi 16.156 kv pada minyak mineral, 14.324 kV pada minyak nabati, dan 18.452 kV pada minyak sintetis. Penurunan ini berlanjut hingga minggu keenam perendaman - Analisis Tegangan Tembus Kertas Isolasi Transformator Akibat Lama
Anthony a	Analisis Tegangan Tembus Kertas	Prosedur pengujian yang sesuai dengan	- Pengaruh tegangan	



(2018)	Isolasi Transformator Akibat Lama Perendaman Pada Isolasi Minyak Transformator	IEC serta membuat modul pada pengujian yang disesuaikan dengan standard modul tegangan tembus yang ada.	tembus akibat penambahan ketebalan kertas. - Pengaruh tegangan tembus terhadap kertas tanpa direndam.	Perendaman Pada Isolasi Minyak Transformator - Nilai <i>breakdown voltage</i> isolasi kertas mengalami kenaikan dengan direndam kedalam minyak, semakin lama direndam didalam minyak maka nilai <i>breakdown voltage</i> akan mengalami peningkatan juga.
4. Haidi Dzulfiqar Fauzan (2019)	Pengaruh Suhu Operasi Transformator Pada Karakteristik Elektris Kertas Isolasi Yang Direndam Dengan Minyak Nabati, Minyak Mineral Dan Minyak Sintetis	<i>Breakdown voltage</i> pada isolasi kertas setelah direndam dan pemanasan.	- Nilai tembus pada isolasi kertas dalam kondisi kering. - Nilai tembus pada isolasi kertas dalam kondisi direndam.	- Nilai <i>breakdown voltage</i> mengalami kenaikan antara isolasi kertas tanpa perendaman dengan isolasi yang terendam dalam minyak isolasi. - Perendaman kertas pada isolasi minyak meningkatkan nilai <i>breakdown voltage</i> , karena rongga yang terdapat pada kertas terisi oleh minyak dan menambah kekuatan isolasi.



5.	Muchammad Faza Nichal (2018)	Analisis Pengaruh Penuaan Termal Dari Isolasi Kertas Kraft Dengan Perendaman Minyak Mineral, Minyak Nabati, Dan Minyak Sintetis Terhadap Karakteristik Elektris	Melakukan uji <i>Break Down Voltage</i> berdasarkan standar IEC 60156.	- Nilai BDV pada sampel uji yang berasal dari lembaran kertas kraft yang telah melalui proses penuaan termal.	- Penuaan termal isolasi kertas yang diresapi minyak menurunkan nilai BDV. - Proses penuaan termal lebih lama = nilai BDV isolasi kertas kraft lebih rendah. - Kertas kraft + minyak mineral = penuaan tinggi 28,2%. - Kertas kraft + minyak nabati = penuaan 27,3%. - Kertas kraft + minyak sintetis = penuaan rendah 25,78%. - Minyak kelapa murni sebagai isolator cair = penuaan lebih rendah daripada minyak mineral pada kertas kraft.
	Puteri	Pengaruh Suhu Terhadap Tegangan Tembus Minyak	Penguujian yang dilakukan menggunakan	- Pengaruh suhu terhadap nilai tegangan	- Hasil uji minyak transformator Shell Diala S4 ZX-I, Nynas Nitro Libra, dan Shell Diala B menunjukkan suhu



---

Transformator Jenis Mineral	elektroda bola-bola dan jarak sela 2,5mm sesuai standar IEC 156	tembus minyak isolasi transformator	<p>memengaruhi tegangan tembus. Tegangan tembus naik sedikit dengan suhu minyak naik.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Shell Diala S4 ZX-I dan Nynas Nitro Libra memenuhi standar IEC 60296 pada suhu ruangan dan 70°C, tetapi minyak bekas Shell Diala B tak sesuai standar kecuali pada 70°C.</li> <li>- Minyak baru lebih stabil terhadap suhu dibandingkan minyak bekas. Tegangan tembus cenderung konstan walaupun suhu naik.</li> <li>- Peningkatan tegangan tembus terjadi karena berkurangnya kadar air saat suhu naik. Air menguap karena titik didihnya lebih rendah daripada minyak, meningkatkan tegangan tembus minyak transformator.</li> </ul>
-----------------------------	---	-------------------------------------	---

---



7	Mika, Lily Setyowati Patras, Fielman Lisi (2019)	Perancangan Pendeteksi Partial Discharge Pada Isolasi Padat	Perancangan Pendeteksi dengan <i>Partial Discharge</i>	- Pengukuran tegangan pada objek  - Pengukuran arus di dalam rangkain luar dan mengukur intensitas radiasi gelombang elektromagnetik yang disebabkan karena adanya partial discharge.	Alat deteksi partial discharge dirancang efektif untuk mengidentifikasi partial discharge pada isolasi padat keramik.  Deteksi dilakukan dengan memantau gelombang dari isolator keramik yang diuji. Data ini akan digunakan sebagai referensi untuk tahap uji selanjutnya. Tingkat partial discharge yang lebih tinggi pada isolator mengindikasikan risiko kegagalan isolator yang lebih cepat.
	 Junaidi	Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Tegangan Tembus	Pengujian tegangan tembus bahan	- Kemampuan untuk menahan panas tinggi	- Pengaruh perubahan suhu akan memengaruhi nilai tegangan tembus (semakin meningkat suhu maka akan

		Pada Bahan Isolasi Cair	dilakukan dengan variasi suhu.	(daya tahan panas) - Kerentanan terhadap perubahan bentuk pada keadaan panas. - Konduktivitas panas tinggi.	semakin meningkat pula nilai tegangan tembus) - Bahan minyak transformator (Diala-B) lebih baik mutunya (nilai tegangan tembus lebih tinggi) dibanding minyak Mesran Super SAE 40.
9	Johanadib Heri, Yuningtyastut, Abdul Syakur (2012)	Studi Arus Bocor Permukaan Bahan Isolasi Resin Epoksi Silane Dengan Variasi Pengisi Pasir Silika (Dengan Polutan Pantai)	Metode pengujian yang digunakan adalah Inclined Plane Tracking (IPT) yang mengacu pada IEC 587 : 1984.	- Besarnya sudut kontak permukaan bahan terhadap tetesan cairan polutan - Analisa arus bocor	- Penambahan komposisi bahan pengisi pasir silika menyebabkan penurunan sudut kontak - Peningkatan komposisi bahan pengisi pasir silika dapat mempercepat proses terjadinya peluahan listrik yang merupakan awal dari proses kegagalan isolasi - Peningkatan komposisi bahan pengisi pasir silika dapat memperkecil nilai



---

					<p>arus bocor pada bahan isolasi resin epoksi silane.</p> <p>- Pola penjejukan pada bahan isolasi resin epoksi ini terjadi dari elektroda tegangan rendah ke tegangan tinggi. Hal ini disebabkan karena arah aliran elektron secara aktual adalah dari elektroda negatif ke elektroda positif.</p>
10	<p>Agung Sukma Hardana, Syamsir Abduh, Tyas Kartika (2022)</p>	<p>Analisis Laju Penuaan Isolasi Kertas Menggunakan Ester Based Oil Pada Transformator Ramah Lingkungan</p>	<p>Menggunakan pengujian laju penuaan isolasi kertas transformator menggunakan ester based oil</p>	<p>- Tan-Delta Test pada Minyak Trafo - Pengujian Breakdown Voltage - Pengujian Derajat Polimerisasi - Analisis Perubahan</p>	<p>Dalam pengujian selama 4 hari, analisis penurunan Daya Pembedaan (DP) pada isolasi kertas menunjukkan bahwa kertas yang direndam dengan minyak berbasis ester memiliki perkiraan penurunan umur isolasi sebesar 4.6 tahun, sementara kertas yang direndam dengan minyak mineral mengalami penurunan umur sekitar 6 tahun. Hasil ini mengindikasikan bahwa ester based oil memiliki efek positif dalam</p>

---



---

Warna pada Isolasi Cair	mengurangi laju penuaan isolasi kertas pada transformator daya dibandingkan mineral oil. Hal ini karena kemampuan ester based oil dalam menyerap air lebih baik, menjaga isolasi kertas tetap kering.
- Analisis Pengaruh Laju Penuaan Isolasi Kertas Berdasarkan Nilai DP	Meskipun nilai tegangan tembus (breakdown voltage) dari ester based oil lebih rendah daripada mineral oil, namun nilai tersebut masih memenuhi persyaratan minimum standar IEC, yaitu 50 kV/2.5 mm. Meski nilai tangen delta ester based oil (0.01917) sedikit lebih tinggi daripada batas yang ditetapkan oleh standar IEC 61099 (0.03), minyak ini tetap memiliki nilai tegangan tembus yang tinggi. Dengan demikian, kesimpulannya adalah bahwa ester based oil memiliki

---



---

dampak positif dalam mengurangi penuaan isolasi kertas pada transformator daya dibandingkan mineral oil. Meskipun nilai tangen delta sedikit melebihi standar, tetapi minyak ini tetap memenuhi persyaratan tegangan tembus yang tinggi sesuai standar IEC.

---

