

**ANALISIS TEGANGAN TEMBUS DAN VISKOSITAS METIL ESTER
MINYAK SAWIT DENGAN PENAMBAHAN *BUTYLATED
HYDROXYANISOLE* (BHA) DAN *BUTYLATED HYDROXYTOLUENE*
(BHT) SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR**

(Skripsi)

Oleh

RIJAL MAHMUD WAHYUDI

NPM 2115031022



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2025

ABSTRAK

ANALISIS TEGANGAN TEMBUS DAN VISKOSITAS METIL ESTER MINYAK SAWIT DENGAN PENAMBAHAN *BUTYLATED HYDROXYANISOLE (BHA)* DAN *BUTYLATED HYDROXYTOLUENE (BHT)* SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR

Oleh

RIJAL MAHMUD WAHYUDI

Minyak isolasi memiliki peranan penting dalam peralatan listrik seperti transformator. Umumnya, minyak isolasi transformator yang digunakan berbahan dasar minyak mineral dimana tidak dapat diperbaharui dan kesertiadaannya yang terbatas. Sehingga dibutuhkan alternatif lain untuk mengatasi masalah tersebut yaitu dengan menggunakan minyak nabati kelapa sawit. Penelitian ini bertujuan mengubah minyak sawit mentah (*crude palm oil*) menjadi minyak metil ester. Konversi minyak sawit mentah menjadi metil ester dilakukan dengan proses esterifikasi dan transesterifikasi. Proses esterifikasi menggunakan katalis asam H_2SO_4 pada suhu $60^\circ C$ dengan perbandingan mol minyak dan methanol sebesar 1 : 6 dan katalis H_2SO_4 1%. Sedangkan proses transesterifikasi menggunakan katalis basa KOH pada suhu $60^\circ C$ dengan perbandingan mol minyak dan methanol sebesar 1 : 20 dan katalis KOH 1%. Kemudian metode yang digunakan yaitu dengan menambahkan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* pada metil ester minyak sawit. Dalam menguji kelayakan metil ester minyak sawit sebagai minyak isolasi maka dilakukan pengujian tegangan tembus dan viskositas. Hasil pengujian menunjukkan nilai viskositas yang telah memenuhi standar SPLN 49 – 91 : 1982 dimana nilai viskositas ≤ 12 cSt pada suhu $40^\circ C$, yaitu sebesar 5,32 cSt dan 5,44 cSt pada konsentrasi BHA dan sebesar 5,44 cSt dan 5,56 cSt pada konsentrasi BHT. Lalu tegangan tembus terbaik yang didapat adalah pada konsentrasi BHA 5 gr yaitu sebesar 37,4 kV, dimana telah memenuhi SPLN 49 – 91 : 1982 yaitu sebesar ≥ 30 kV. Hal ini menunjukkan minyak metil ester minyak sawit dengan penambahan *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* berpotensi untuk diolah sebagai minyak isolasi transformator, namun perlu penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan karakteristik sesuai standar minyak isolasi transformator.

Kata kunci : Minyak sawit mentah, minyak metil ester, esterifikasi, transesterifikasi.

ABSTRACT

ANALYSIS OF BREAKDOWN VOLTAGE AND VISCOSITY OF PALM OIL METHYL ESTERS WITH THE ADDITION OF BUTYLATED HYDROXYANISOLE (BHA) AND BUTYLATED HYDROXYTOLUENE (BHT) AS AN ALTERNATIVE TO TRANSFORMER OIL INSULATION

By

RIJAL MAHMUD WAHYUDI

The insulating oil has an important role in electrical equipment such as transformers. Generally, the transformer insulating oil used is based on mineral oil which cannot be renewed and its availability is limited. So another alternative is needed to overcome this problem, namely by using palm vegetable oil. This research aims to convert crude palm oil into methyl ester oil. The conversion of crude palm oil into methyl ester is done by esterification and transesterification process. The esterification process uses H₂SO₄ acid catalyst at 60°C with a mole ratio of oil and methanol of 1: 6 and 1% H₂SO₄ catalyst. While the transesterification process uses KOH base catalyst at 60°C with a mole ratio of oil and methanol of 1 : 20 and 1% KOH catalyst: 20 and 1% KOH catalyst. Then the method used is by adding butylated hydroxyanisole and butylated hydroxytoluene additives to palm oil methyl esters. In testing the feasibility of palm oil methyl ester as an insulating oil, the breakdown voltage and viscosity were tested. The test results show that the viscosity value meets the SPLN 49-91 standard: 1982 where the viscosity value ≤ 12 cSt at 40°C, namely 5.32 cSt and 5.44 cSt at BHA concentration and 5.44 cSt and 5.56 cSt at BHT concentration. Then the best breakdown voltage obtained is at a concentration of BHA 5 gr which is 37.4 kV, which has met SPLN 49 - 91: 1982 which is ≥ 30 kV. This shows that palm oil methyl ester oil with the addition of butylated hydroxyanisole and butylated hydroxytoluene has the potential to be processed as transformer insulation oil, but further research is needed to obtain characteristics according to transformer insulation oil standards.

Keyword : Crude palm oil, methyl ester oil, esterification, transesterification.

**ANALISIS TEGANGAN TEMBUS DAN VISKOSITAS METIL ESTER
MINYAK SAWIT DENGAN PENAMBAHAN *BUTYLATED
HYDROXYANISOLE* (BHA) DAN *BUTYLATED HYDROXYTOLUENE*
(BHT) SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR**

Oleh

RIJAL MAHMUD WAHYUDI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2025

Judul Skripsi

: **ANALISIS TEGANGAN TEMBUS DAN VISKOSITAS METIL ESTER MINYAK SAWIT DENGAN PENAMBAHAN BUTYLATED HYDROXYANISOLE (BHA) DAN BUTYLATED HYDROXYTOLUENE (BHT) SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR**

Nama Mahasiswa

: **Rijal Mahmud Wahyudi**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115031022

Jurusan

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing


Dr. Herman Halomoan S, S.T., M.T.

NIP. 19711130 199903 1 003


Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.

NIP. 19700528 199803 2 003

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro


Herlinawati, S.T., M.T.

NIP. 19710314 199903 2 001


Sumadi, S.T., M.T.

NIP. 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Herman Halomoan S, S.T., M.T.**



Sekretaris : **Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.**



Penguji : **Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.**



Bukan Pembimbing

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 13 Juni 2025

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rijal Mahmud Wahyudi

Npm : 2115031022

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi saya yang berjudul, “Analisis Tegangan Tembus dan Viskositas Metil Ester Minyak Sawit dengan Penambahan *Butylated Hydroxyanisole* (BHA) dan *Butylated hydroxytoluene* (BHT) Sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator” merupakan asli penelitian saya. Pada skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 30 Juni 2025



Rijal Mahmud Wahyudi

NPM.2115031022

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Panaragan, Tulang Bawang Barat pada tanggal 22 Juli 2002. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Mulud dan Ibu Mahrani.

Riwayat Pendidikan penulis dimulai dari TK Pertiwi Panaragan pada tahun 2008 hingga 2009, SDN 1 Panaragan pada tahun 2009 hingga 2015, SMPN 2 Tulang Bawang Tengah pada tahun 2015 hingga 2018, dan SMAN 1 Tulang Bawang Tengah pada tahun 2018 hingga 2021.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2021 melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis berkesempatan bergabung dalam keanggotaan asisten Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi pada tahun 2024 dan dipercayakan menjadi asisten mata kuliah Praktikum Teknik Tegangan Tinggi pada tahun 2024. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) sebagai anggota Departemen Komunikasi dan Informasi selama 2 periode pada tahun 2022 dan 2023. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. PLN (Persero) ULTG Tegineneng dan mengangkat judul, “Analisis Pengujian Tahanan Isolasi Pada *Lightning Arrester* (LA) 150 kV Bay Penghantar Seputih Banyak 1 Pada Gardu Induk Sribawono” pada tahun 2024.

Alhamdulillah, atas izin Allah yang Maha Kuasa

Karya ini kupersembahkan kepada

Ayah tercinta dan Ibu tercinta

MULUD dan MAHRANI

yang senantiasa tiada henti memberikan semua hal terbaik demi
putranya untuk mencapai kesuksesan

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater

MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(QS. Al – Insyirah: 5 – 6)

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar”

(QS. Ar – Rum: 60)

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya...”

(QS. Al – Baqarah: 286)

“Semangat dan doa adalah kekuatan”

(Ríjal Mahmud Wahyudí)

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul, “Analisis Tegangan Tembus dan Viskositas Metil Ester Minyak Sawit dengan Penambahan *Butylated Hydroxyanisole* (BHA) dan *Butylated Hydroxytoluene* (BHT) Sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

Selama menjalani pengerjaan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak masukan, bantuan, dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan kali ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rezeki serta Kesehatan sehingga mampu terlalannya penelitian ini hingga menyelesaikan skripsi.
2. Kedua orang tua tercinta, Abah dan Bunda yang selalu memberikan doa, dukungan, dan kasih sayang tak terhingga kepada penulis selama menempuh pendidikan.
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN.Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
5. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
7. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam

membimbing kepada penulis. Terima kasih atas ilmu, nasihat, saran, krititik, serta motivasi selama proses penyusunan skripsi ini dan selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung.

8. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing kepada penulis. Terima kasih atas ilmu, nasihat, saran, kritik, dan motivasi selama proses penyusunan skripsi dan selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung.
9. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T. selaku dosen penguji utama dalam proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas ilmu, nasihat, saran, kritik, serta motivasi selama proses penyusunan skripsi ini dan selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung.
10. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bantuan, doa, dukungan, serta nasihat kepada penulis selama perkuliahan.
11. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu, pengajaran, serta bimbingan selama penulis menjalani perkuliahan di Teknik Elektro Universitas Lampung.
12. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam segala hal administrasi.
13. Bapak Eko Prastyo selaku Supervisor Pemeliharaan Gardu Induk ULTG Tegingeneng yang telah membantu dan membimbing penulis selama proses penelitian berlangsung.
14. Ibu Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T. selaku dosen kepala Laboratorium Analisa dan Instrumentasi Teknik Kimia yang telah memberikan bantuan dan bimbingan kepada penulis selama penelitian berlangsung.
15. Kak Heru, Kak Azzam, Puji, Ubit, Wahid, serta semua teman – teman dan kakak – kakak Laboratorium Analisa dan Instrumentasi Teknik Kimia yang selalu membantu, memberikan nasihat, serta saran kepada penulis selama melakukan penelitian ini.

16. Teruntuk Arya Nugraha, Jefri Prayoga, Ruli Amar Ma'ruf, dan Piz Roni selaku rekan sekaligus keluarga, terima kasih penulis ucapkan atas semangat dan kebersamaan yang sungguh luar biasa hingga saat ini.
17. Teruntuk Serly Ulya Wardani selaku rekan partner seperbimbingan, terima kasih atas segala bantuan, kerja sama, dan saling berbagi ilmu selama melakukan penelitian hingga penyusunan skripsi.
18. Teruntuk Noven, Mahen, Mando, Afdhal, Rizfeb, Rika, Ananda, Dona, Siti, Luki, Benyamin, Alex, Daniel, Deni, Bimo, dan seluruh rekan – rekan konsentrasi Teknik Tegangan Listrik yang telah menjadi teman yang baik selama perkuliahan.
19. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Bapak Sugiarto, S.T., Kak Ronald Agustinus Sitorus, S.T., dan kakak – kakak serta adik – adik Asisten Lab TTT 2025 terima kasih atas bantuan, bimbingan, nasihat, ilmu dan kerja sama selama penulis menjadi asisten laboratorium.
20. Teruntuk inisial DEA, terima kasih atas segala dukungan, semangat, doa, motivasi, dan nasihat kepada penulis hingga penulis menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik – baiknya.
21. Segenap Keluarga Besar EXCALTO 21, dan teman – teman yang menjadi telah menjadi keluarga bagi penulis.
22. Rekan – rekan HIMATRO serta kakak – kakak dan adik – adik tingkat Jurusan Teknik Elektro.
23. Semua pihak yang telah membantu penulis selama pelaksanaan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 30 Juni 2025

Rijal Mahmud Wahyudi

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Isolasi Minyak	6
2.2 Minyak Nabati Sawit Sebagai Isolasi Cair	8
2.3 Proses Esterifikasi.....	11
2.4 Zat Aditif	12
2.5 Tegangan Tembus.....	15
2.6 Viskositas.....	16
III. METODOLOGI PENELITIAN	17

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	17
3.2 Alat dan Bahan	17
3.3 Metode Penelitian.....	18
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	25
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	26
4.1 Pembuatan Metil Ester Minyak Sawit	26
4.1.1 Proses Esterifikasi	26
4.1.2 Proses Pencucian I.....	29
4.1.3 Proses Transesterifikasi.....	30
4.1.4 Proses Pencucian II	32
4.1.5 Proses Pengeringan (<i>Drying</i>) dan Absorpsi	33
4.1.6 Uji Kualitas Metil Ester Minyak Sawit.....	36
4.2 Penambahan Zat Aditif	37
4.3 Pengujian Viskositas.....	39
4.4 Pengujian Tegangan Tembus.....	42
V. KESIMPULAN DAN SARAN	46
5.1 KESIMPULAN	46
5.2 SARAN.....	47
DAFTAR PUSTAKA	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Metil Ester	10
Gambar 2.2 Struktur Esterifikasi.....	12
Gambar 2.3 Skema Pengujian Tegangan Tembus	15
Gambar 3.1 Rincian Waktu Penelitian.....	17
Gambar 3.2 Viskometer Ostwald	24
Gambar 4.1 (a) sampel sebelum ditambahkan H_2SO_4 (b) sampel sesudah ditambahkan H_2SO_4	28
Gambar 4.2 (a) Pencucian sampel esterifikasi (b) Hasil pencucian sampel	29
Gambar 4.3 (a) Sampel sebelum ditambakan KOH (b) Sampel sesudah ditambahkan KOH	32
Gambar 4.4 (a) Proses pemisahan sampel dengan KOH (b) Hasil pemisahan sampel dengan KOH.....	33
Gambar 4.5 Proses pengeringan dengan vacuum oven.....	34
Gambar 4.6 Proses absorspsi dengan desikator	34
Gambar 4.7 (a) Sampel hasil esterifikasi (b) Sampel hasil transesterifikasi.....	35
Gambar 4.8 (a) Zat aditif BHA 2,5 gr (b) Zat aditif BHT 2,5 gr	37
Gambar 4.9 Pencampuran zat aditif dengan metil ester minyak sawit	38
Gambar 4.10 Hasil pencampuran zat aditif dengan metil ester sawit	39
Gambar 4.11 Pengujian viskositas menggunakan <i>viscometer ostwald</i>	40
Gambar 4.12 Pengujian Viskositas Metil Ester Minyak Sawit dengan Penambahan Zat Aditif BHA dan BHT.....	41
Gambar 4.13 Pengujian tegangan tembus menggunakan megger OTS80AF <i>Oil Tester</i>	42
Gambar 4.14 Pengujian Tegangan Tembus Metil Ester Minyak Sawit dengan Penambahan Zat Aditif BHA dan BHT	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Minyak Isolasi dalam Kondisi Baru.	7
Tabel 3.1 Parameter Pengujian Kualitas Metil Ester Minyak Sawit.....	21
Tabel 4.1 Persentase metil ester minyak sawit yang dihasilkan	36
Tabel 4.2 Hasil pengujian kualitas metil ester minyak sawit.....	36
Tabel 4.3 Variasi konsentrasi penambahan zat aditif pada metil ester minyak sawit	38
Tabel 4.4 Data hasil pengujian viskositas	40
Tabel 4.5 Data hasil pengujian tegangan tembus metil ester minyak sawit tanpa zat aditif dan dengan penambahan zat aditif BHA dan BHT	43

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Transformator merupakan salah satu peralatan penting dalam melakukan proses distribusi energi listrik. Dalam melakukan pendistribusian energi listrik, hal yang penting untuk diperhatikan agar transformator dapat bekerja dengan baik adalah minyak isolasi pada transformator. Hal ini dikarenakan waktu pengoperasian dari transformator yang secara terus menerus sehingga dapat menimbulkan panas pada transformator, maka diperlukan pendingin berupa isolasi cair. Umumnya, isolasi minyak pada transformator yang dipergunakan berbahan dasar minyak bumi atau minyak mineral.

Minyak mineral memiliki beberapa keunggulan sebagai bahan isolasi cair seperti memiliki daya serap yang baik, nilai tegangan tembus yang tinggi, dan memiliki jangka waktu penggunaan yang lama. Namun, bahan dasar minyak mineral ini memiliki kekurangan dimana minyak jenis ini lama kelamaan akan habis karena sifatnya yang tidak dapat diperbaharui. Selain itu, minyak mineral memiliki sifat tidak dapat terdegradasi sehingga menyebabkannya tidak ramah lingkungan. Untuk mengatasi masalah minyak mineral ini, salah satu upaya yang dilakukan agar memiliki sifat yang ramah lingkungan dan mudah diperbaharui yaitu dengan mencari alternatif lain seperti menggunakan minyak yang berasal dari tumbuhan atau yang biasa disebut sebagai minyak nabati sebagai minyak isolasi transformator.

Minyak sawit (*palm oil*) merupakan salah satu jenis minyak nabati yang diperoleh dari buah kelapa sawit. Minyak sawit ini memiliki keunggulan yaitu dapat diperbaharui sehingga potensi dari ketersediaannya dapat terjaga, serta dapat terdegradasi sehingga bersifat ramah lingkungan. Namun, minyak sawit juga memiliki kekurangan yaitu sifat kekentalannya yang tinggi. Selain itu, minyak

sawit juga memiliki nilai tegangan tembus yang rendah dan belum memenuhi SPLN 49-1 tahun 1982. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk memperbaiki kualitas minyak sawit tersebut agar dapat dipergunakan sebagai minyak isolasi. Upaya yang dapat dilakukan yaitu dengan melakukan reaksi esterifikasi dan transesterifikasi pada minyak sawit yang akan dipergunakan. Selain itu, perlu adanya penambahan zat aditif pada minyak sawit agar dapat menurunkan nilai viskositas dan meningkatkan nilai tegangan tembus pada minyak nabati sawit.

Penelitian ini membahas mengenai pengolahan minyak nabati sawit menjadi metil ester. Pengolahan dilakukan melalui proses esterifikasi dan transesterifikasi. Penelitian ini dilakukan terhadap metil ester minyak sawit dalam upaya menjadikan minyak sawit sebagai alternatif minyak isolasi transformator. Adapun metode yang digunakan pada penelitian adalah dengan menambahkan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene*. Parameter yang dianalisis dari pengujian minyak sawit adalah nilai tegangan tembus dan viskositas.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana proses membuat metil ester minyak sawit.
2. Bagaimana melakukan pencampuran zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* dengan metil ester minyak sawit.
3. Bagaimana melakukan pengujian metil ester minyak sawit.
4. Bagaimana pengaruh yang timbul dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* pada metil ester minyak sawit terhadap nilai tegangan tembus dan viskositas.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memproses minyak sawit mentah menjadi metil ester minyak sawit.
2. Menganalisis kelayakan metil ester minyak sawit dengan parameter nilai massa jenis, bilangan asam, dan viskositas kinematik.

3. Menguji viskositas dan tegangan tembus metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* sebagai alternatif isolasi minyak transformator.
4. Menganalisis nilai tegangan tembus dan viskositas metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* sebagai bahan dasar isolasi minyak.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak melakukan analisis mengenai oksidasi saat pengujian tegangan tembus.
2. Tidak melakukan uji sifat fisik dan kimia terhadap zat aditif *butylated hydroxyanisole* maupun *butylated hydroxytoluene*.
3. Pengolahan metil ester hanya melalui proses esterifikasi dengan katalis asam H_2SO_4 dan proses transesterifikasi dengan katalis basa KOH.
4. Tidak melakukan analisis mengenai reaksi kimia yang terjadi pada metil ester minyak sawit setelah penambahan zat aditif.
5. Tidak mempertimbangkan apakah terdapat zat pengotor pada sampel metil ester minyak sawit.
6. Penelitian dilakukan dengan pengujian tegangan tembus dan viskositas metil ester minyak sawit sesuai standar SPLN 49-1 : 1982.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan informasi mengenai rekomendasi kelayakan metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* jika digunakan sebagai alternatif bahan dasar isolasi minyak transformator yang ramah lingkungan, mudah didapat serta dapat diperbaharui.

1.6 Hipotesis

Penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* pada metil ester minyak sawit dapat menurunkan viskositas (kekentalan) dan tidak memperburuk tegangan *breakdown* yang menjadikan minyak sawit ini layak untuk digunakan sebagai pengganti minyak mineral untuk isolasi minyak transformator.

1.7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi tentang latar belakang, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, serta sistematika penulisan laporan skripsi

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisi tentang teori-teori yang berkaitan dan yang digunakan pada pengerjaan skripsi ini.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang informasi berkenaan dengan waktu dan tempat penelitian, peralatan yang digunakan, serta tahapan yang dilakukan pada penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi tentang analisis hasil yang didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan. Adapun analisis dilakukan pada hasil pengujian tegangan tembus dan viskositas dari metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene*.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran setelah penulis selesai melakukan penelitian ini yang berdasarkan dari hasil dan pembahasan yang telah didapat.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bab ini berisi tentang daftar sumber kutipan teori yang dijadikan acuan dalam penulisan skripsi ini.

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

Salah satu isolasi yang umum digunakan pada peralatan tegangan tinggi adalah minyak transformator. Minyak isolasi transformator memiliki peranan penting dalam melakukan pendistribusian energi listrik. Pentingnya peran minyak isolasi pada trafo ini menuntut upaya agar diperoleh minyak isolasi yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui. Penelitian ini membahas mengenai bahan isolasi cair tegangan tinggi dari minyak nabati yaitu metil ester minyak sawit (*palm oil*) dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* (BHA) dan *butylated hydroxytoluene* (BHT) sebagai alternatif isolasi minyak transformator.

2.1 Isolasi Minyak

Minyak isolasi termasuk dalam jenis isolasi cair. Minyak isolasi memiliki peranan penting dalam peralatan listrik seperti transformator. Selain berfungsi sebagai isolasi, minyak isolasi juga berfungsi sebagai media pendingin pada transformator [1]. Umumnya minyak yang digunakan sebagai isolator cair berbahan dasar minyak mineral yang diperoleh dari pengolahan bahan-bahan tambang atau minyak bumi yang tidak dapat diperbaharui. Penggunaan dari minyak mineral sebagai bahan dasar minyak isolasi transformator memiliki kelebihan serta kekurangan. Kelebihan dari minyak mineral sebagai bahan isolator cair ini yaitu memiliki nilai tegangan tembus yang tinggi dan daya serap yang baik. Namun, disisi lain minyak mineral ini memiliki kelemahan yaitu memiliki tingkat biodegradasi yang rendah, yakni sekitar 30%. Rendahnya Tingkat biodegradasi minyak mineral ini dapat menyebabkan pencemaran lingkungan apabila terjadi kebocoran tangki transformator atau jika minyak sisa pakai dibuang. Selain itu, minyak mineral ini tentu lama-kelamaan akan habis karena sifatnya yang tidak dapat diperbaharui. Dari kelemahan minyak mineral tersebut, maka penggunaan dari minyak mineral

sebagai isolasi minyak transformator harus dikurangi. Dalam upaya mengurangi penggunaan minyak mineral maka harus dilakukan pengembangan terhadap jenis minyak lainnya seperti minyak nabati sebagai alternatif minyak isolasi transformator.

Adapun syarat-syarat minyak isolasi sebagai isolator pada transformator adalah sebagai berikut:

- Mempunyai kekuatan dielektrik (tegangan tembus) yang tinggi
- Mempunyai nilai viskositas (kekentalan) yang rendah
- Mempunyai titik nyala yang tinggi
- Mempunyai titik tuang yang rendah
- Mempunyai daya hantar panas yang baik
- Tidak bersifat korosif
- Tahan terhadap oksidasi

Sedangkan standarisasi spesifikasi dari minyak isolasi untuk menjaga keamanan penggunaan berdasarkan SPLN 49-1 adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Spesifikasi Minyak Isolasi dalam Kondisi Baru.

No	Sifat	Satuan	Kelas 1	Kelas 2	Metode Uji
1	Kejernihan	-	Jernih		IEC 296
2	Massa Jenis	g/cm ³	≤ 0,895		IEC 296
3	Viskositas	cSt	≤ 40	≤ 25	IEC 296
4	Kinematika -15°C	cSt	≤ 800	-	IEC 296
	-30°C	cSt	-	≤ 800	IEC 296
5	Titik Nyala	°C	≥ 140	≥ 130	IEC 296
6	Titik Tuang	°C	-30	-40	IEC 296
7	Angka Kenetralan	mg KOH/s	≤ 0,03		IEC 296
8	Korosi Belerang	-	Tidak Korosif		IEC 296
9	Tegangan Tembus	kv/2,5 mm			

	-Sebelum diolah	-	≥ 30	IEC 296
	-Sesudah diolah	-	≥ 50	
10	Faktor Kebocoran Dielektrik	-	$\leq 0,05$	IEC 296
11	Ketahanan Oksidasi			IEC 474 & IEC 74
	-Angka Kenetralan	mg/KOH/g	≤ 40	
	-Kotoran	%	$\leq 0,10$	

2.2 Minyak Nabati Sawit Sebagai Isolasi Cair

Minyak isolasi yang dipergunakan pada transformator umumnya berbahan dasar minyak mineral. Namun, kelemahan yang terdapat pada minyak mineral diantaranya seperti tidak dapat diperbaharui dan rendahnya tingkat biodegradasi menjadi tuntutan untuk mengurangi penggunaan minyak mineral sebagai isolasi minyak transformator. Kelemahan dari minyak mineral ini tentu dapat menimbulkan dampak yang buruk bagi lingkungan. Oleh karena itu, perlu adanya pengembangan terhadap jenis lain yang lebih ramah lingkungan dan jumlah ketersediaannya tidak terbatas (mudah diperbaharui). Dalam hal ini, minyak nabati menjadi pilihan yang tepat sebagai alternatif isolasi minyak transformator. Minyak nabati yang merupakan berasal dari biji tumbuh-tumbuhan dianggap sebagai kandidat yang paling tepat sebagai minyak isolasi yang ramah lingkungan. Tingkat keterbiodegradasian minyak nabati mencapai 97% atau bahkan terbiodegradasi penuh [2].

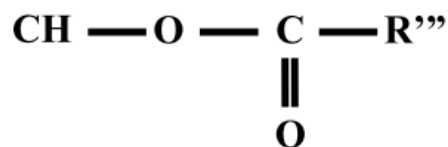
Minyak nabati umumnya berbentuk trigliserida atau triester yang merupakan senyawa dari gliserol dan asam lemak, baik asam lemak jenuh maupun tak jenuh. Jenis-jenis minyak nabati yang telah diteliti sebagai bahan dasar isolasi minyak transformator antara lain seperti minyak jarak, minyak jagung, minyak kemiri, dan lain sebagainya. Pada penelitian kali ini, minyak nabati yang dipergunakan penulis adalah minyak sawit (*palm oil*) yang akan diproses menjadi metil ester dengan penambahan zat aditif sebagai alternatif isolasi minyak transformator.

Minyak sawit mentah (*crude palm oil*) merupakan salah satu jenis minyak nabati yang diperoleh dari biji buah kelapa sawit. Minyak sawit memiliki ketersediaan yang melimpah, terutama di daerah tropis seperti Indonesia. Berdasarkan Badan Pusat Statistik (BPS) Tahun 2021 luas permukaan kelapa sawit di Indonesia mencapai 14,8 juta dan nilai produksi kelapa sawit mencapai 46,22 juta ton. Minyak sawit ini memiliki kelebihan yaitu jenis bahan minyak nabati yang ramah lingkungan dan mudah diperbaharui karena ketersediannya yang melimpah. Selain itu, minyak sawit memiliki sifat tahan terhadap panas, memiliki nilai titik bakar yang tinggi, serta tidak bersifat korosi. Minyak sawit mengandung asam lemak jenuh dengan persentase kandungan paling tinggi adalah 44% asam palminat dan 5% asam stearat. Sedangkan untuk kandungan asam lemak tak jenuh kelapa sawit dengan persentase paling tinggi adalah 40% asam oleat dan 10% asam linoleat dan asam linolenat.

Minyak sawit termasuk salah satu jenis minyak nabati yang diusulkan sebagai minyak isolasi alternatif. Pengujian yang dilakukan oleh Abdul Rajab dkk. Pada tahun 2009 menunjukkan bahwa karakteristik listrik minyak sawit jenis RBDPO Olein memenuhi standar ASTM D-6871 : 2003 sebagai kandidat minyak isolasi transformator [3]. Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Ronald Agustinus Sitorus pada tahun 2023. Pada penelitian tersebut diperoleh dengan pengujian tegangan tembus dan viskositas terhadap minyak sawit mentah (CPO) menggunakan Megger OTS80AF didapatkan nilai tegangan tembus sebesar 10,285 kV/2,5 mm dan viskositas sebesar 25,29 cSt dimana nilai tersebut belum memenuhi SPLN 49-1 : 1982 [4]. Luasnya persebaran kelapa sawit di Indonesia ini tentu dapat menjadi alternatif dalam pengembangan minyak seperti menjadikannya minyak isolasi. Dengan adanya pengembangan minyak kelapa sawit menjadi bahan dasar isolasi minyak diharapkan dapat memenuhi standar minyak isolasi transformator yang sesuai dengan SPLN 49-1 tahun 1982, sehingga ketergantungan terhadap penggunaan minyak mineral sebagai bahan dasar isolasi dapat berkurang.

Minyak sawit mentah (CPO) dapat diolah menjadi metil ester minyak sawit (biodiesel). Metil ester merupakan senyawa yang terbentuk akibat reaksi antara asam lemak dengan alkohol (*methanol*). Metil ester didapatkan melalui dua tahapan yaitu esterifikasi dan transesterifikasi [5]. Esterifikasi dilakukan dengan

mereaksikan minyak sawit dengan methanol dan katalis. Perbandingan mol methanol terhadap massa minyak adalah 6 : 1 dengan konsentrasi katalis sebesar 1% dari minyak sawit. Proses esterifikasi biasanya berlangsung selama 45 menit. Hasil esterifikasi akan dilanjutkan dengan transesterifikasi. Transesterifikasi dilakukan dengan mereaksikan methanol dengan hasil esterifikasi. Pada proses transesterifikasi, perbandingan mol methanol dengan minyak sawit sama, yaitu 6 : 1 dan konsentrasi katalis sebesar 1%. Pada penelitian yang dilakukan oleh Abdul Rajab dkk. Pada tahun 2014 didapatkan hasil bahwa nilai viskositas metil ester minyak sawit telah memenuhi standar sebagai minyak isolasi, akan tetapi untuk nilai tegangan tembusnya masih belum memenuhi standar yaitu sebesar 12,8 kV/2,5 mm[3].



Gambar 2.1 Struktur Metil Ester[3]

Minyak nabati dapat dipergunakan sebagai alternatif isolasi minyak transformator menggantikan minyak mineral. Namun, minyak nabati ini juga selain memiliki kelebihan juga memiliki kelemahan-kelemahan. Kelemahan paling utama pada minyak nabati ini diantaranya yaitu nilai tegangan tembus yang belum memenuhi standar yang telah ditetapkan. Selain itu, minyak nabati juga memiliki sifat yang lebih kental dibandingkan dengan minyak mineral. Standar tegangan tembus dan nilai viskositas (kekentalan) pada minyak isolasi transformator diatur dalam SPLN 49-1 tahun 1982. Dalam standar tersebut, besar nilai tegangan tembus minyak isolator adalah sebesar ≥ 30 kV/2,5 mm dan untuk nilai viskositasnya adalah sebesar ≤ 40 cSt. Minyak nabati dari berbagai jenis tumbuhan umumnya memiliki nilai viskositas yang tinggi yaitu lebih besar dari 40 cSt, sehingga nilai ini melebihi nilai standar SPLN 49-1 tahun 1982. Salah satu upaya untuk memperbaiki nilai tegangan tembus dan nilai viskositas dari minyak nabati ini yaitu dengan cara menambahkan zat aditif.

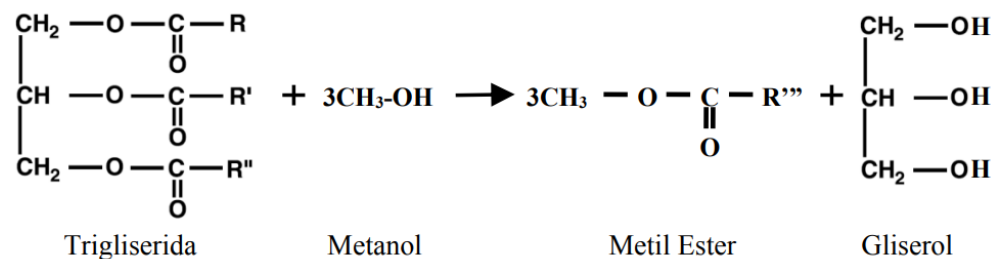
2.3 Proses Esterifikasi

Minyak nabati sawit (*crude palm oil*) dapat diubah menjadi metil ester minyak sawit. Metil ester minyak sawit dapat diperoleh melalui proses esterifikasi. Esterifikasi merupakan proses mengubah trigliserida menjadi gliserol dengan bantuan katalis sehingga menghasilkan metil ester. Umumnya, katalis yang dipergunakan pada proses esterifikasi yaitu jenis katalis basa. Hal ini karena katalis basa dianggap lebih aman dibandingkan dengan katalis asam. Adapun jenis katalis basa yang biasa digunakan yakni katalis basa homogen dan katalis basa heterogen. Kedua jenis katalis basa ini masing-masing memiliki keunggulan dan kelebihan.

Pada proses pembuatan minyak metil ester, katalis basa homogen sering dipergunakan karena dapat beroperasi pada tekanan dan suhu yang relatif rendah. Selain itu, katalis ini memiliki efisiensi yang tinggi, sehingga menjadikannya pilihan yang unggul. Namun, kelemahan katalis homogen ini yaitu sulit untuk dipisahkan dan tidak bisa digunakan kembali setelah bereaksi dengan bahan campuran, sehingga akan berpotensi menjadi limbah. Contoh katalis basa homogen yang umum digunakan adalah natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH). Berbeda dengan katalis basa homogen, pada katalis basa heterogen justru dapat digunakan kembali jika sudah bereaksi dengan bahan campuran. Katalis basa heterogen dapat dengan mudah dipisahkan dari campuran reaksi, sehingga tidak berpotensi menjadi limbah. Namun, kelemahan dari katalis basa heterogen ini yaitu memiliki nilai efisiensi yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan katalis basa homogen. Contoh katalis basa heterogen yang umum digunakan adalah kalsium oksida (CaO) [6]. Penggunaan katalis yang tepat tentu dapat memperoleh hasil reaksi esterifikasi yang baik.

Agar mendapatkan hasil reaksi esterifikasi yang baik, terdapat syarat khusus dalam penggunaan katalis basa pada proses esterifikasi, yaitu menggunakan alkohol dalam keadaan anhidrous dengan kadar air sebesar $<0.1 - 0.5\%$ serta kandungan asam lemak bebas pada minyak yang digunakan sebesar $<0.5\%$ [7]. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Alifiah pada tahun 2019 didapatkan hasil bahwa pengujian dengan menggunakan minyak metil ester biji karet menghasilkan tegangan tembus sebesar 48.013 kV/2,5 mm [6]. Setelah selesai

tahap proses pencampuran katalis dengan bahan reaksi lainnya, maka akan dihasilkan bentuk metil ester minyak nabati.



Gambar 2.2 Struktur Esterifikasi[3]

Metil ester minyak sawit dikatakan berhasil jika nilai yang didapatkan telah sesuai dan memenuhi standar yang telah ditetapkan. Berdasarkan SNI 04-7182-2006 menyebutkan bahwa keberhasilan suatu metil ester (biodiesel) ditandai dengan beberapa parameter, yaitu nilai kadar ester sebesar 96.5%, bilangan asam maksimal sebesar 0.8 mgKOH/g, serta kadar air maksimal sebesar 0.05% [8].

2.4 Zat Aditif

Zat aditif merupakan bahan atau zat yang ditambahkan pada zat lainnya yang bertujuan untuk memberikan perbaikan pada zat yang ditambahkan. Umumnya, zat aditif ditambahkan pada makanan, minuman, maupun obat-obatan untuk meningkatkan sifat, warna, maupun cita rasa. Begitupun pada minyak nabati, zat aditif ditambahkan dengan tujuan untuk memperbaiki sifat dari minyak tersebut. Hal ini dilakukan karena pada minyak nabati memiliki sifat yang menjadi kelemahan. Kelemahan itu yakni memiliki nilai viskositas atau kekentalan yang tinggi, sehingga penambahan zat aditif diharapkan dapat memperbaiki nilai viskositas pada minyak nabati. Selain itu, penambahan zat aditif pada minyak nabati juga bertujuan untuk meningkatkan nilai tegangan tembus pada minyak nabati, sehingga nilai tegangan tembusnya menjadi lebih tinggi. Adapun jenis-jenis zat aditif yang dapat digunakan untuk memperbaiki isolasi minyak transformator adalah seperti *butylated hydroxyanisole* (BHA), fenol, dan *butylated hydroxytoluene* (BHT).

Butylated Hydroxyanisole (BHA) atau Butil Hidroksi Anisol merupakan jenis zat aditif dengan rumus kimia $C_{11}H_{16}O_2$. *Butylated Hydroxyanisole* ini adalah gabungan dari 2 senyawa fenol isomerik, yaitu *2-tert-butyl-4-hydroxyanisole* dan *3-tert-butyl-4-hydroxyanisole*. Berdasarkan senyawa tersebut, *butylated hydroxyanisole* memiliki sifat tidak dapat larut dalam air namun dapat larut dalam *methanol* dan *ethanol*. *Butylated Hydroxyanisole* bekerja sebagai antioksidan untuk menjaga stabilisator untuk radikal bebas. Adapun sifat kimia dari *butylated hydroxyanisole* ini yaitu memiliki berat jenis sebesar 1.117 gr/ml, berat molekul sebesar 180,25 gr/mol, titik beku sebesar $48^{\circ}C$, dan titik didih sebesar $264^{\circ}C$ [9].

Fenol atau asam karbol merupakan jenis zat aditif dengan rumus kimia C_6H_6O . *Fenol* memiliki sifat yang cenderung asam, artinya sifat ini dapat melepaskan ion H^+ dari gugus hidroksinya. Sifat ini menjadikan *fenol* dapat larut dalam air. *Fenol* juga memiliki kandung senyawa hidrokarbon yang berfungsi untuk menghambat oksidasi, namun jika kandungannya terlalu banyak maka akan memperburuk yaitu menurunkan nilai kekuatan dielektrik (tegangan tembus). Adapun sifat kimia dari fenol ini yaitu memiliki berat jenis sebesar 1.057 gr/ml, berat molekul sebesar 94,11 gr/mol, titik beku sebesar $42^{\circ}C$, dan titik didih sebesar $182^{\circ}C$. Pada penelitian yang dilakukan oleh Aldianto Wahyu Ramadhan pada tahun 2019 didapatkan hasil bahwa penambahan zat aditif fenol pada minyak goreng kelapa sawit mampu meningkatkan nilai tegangan tembus sebesar 34.446 kV/2,5 mm [10]. Selanjutnya, pada penelitian yang dilakukan oleh M. Ikhsan Nurharyadi pada tahun 2021 didapatkan hasil bahwa penggunaan zat aditif fenol pada minyak kelapa sawit mampu meningkatkan nilai tegangan tembus tertinggi sebesar 34.1 kV/2,5 mm dengan konsentrasi fenol sebesar 2% [11].

Butylated Hydroxytoluene (BHT) atau Butil Hidroksi Toluena merupakan jenis zat aditif dengan rumus kimia $C_{15}H_{24}O$. *Butylated Hydroxytoluene* ini adalah senyawa organik lipofilik yang secara kimia merupakan turunan dari fenol yang berguna untuk sifat antioksidannya. Sama seperti *butylated hydroxyanisole* (BHA), *butylated hydroxytoluene* ini juga memiliki sifat tidak dapat larut dalam air, namun dapat larut dalam minyak atau lemak. *Butylated Hydroxytoluene* juga mengandung senyawa hidrokarbon yang berfungsi sebagai penghambat oksidasi dan menjaga kestabilan minyak. Adapun sifat kimia dari *butylated hydroxytoluene* ini yaitu

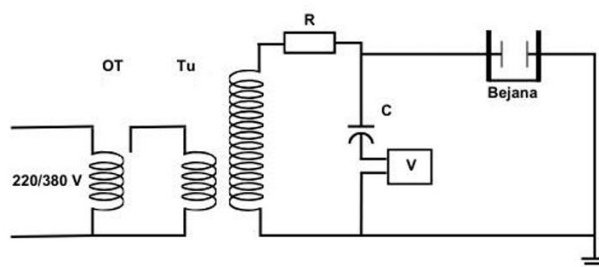
memiliki berat jenis sebesar 1.031 gr/ml, berat molekul sebesar 220,35 gr/mol, titik lebur sebesar 70°C, dan titik didih sebesar 182°C. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ade Firmansyah pada tahun 2019 didapatkan hasil bahwa penggunaan zat aditif *butylated hydroxytoluene* pada minyak kemiri sunan mampu meningkatkan nilai tegangan tembus sebesar 34.97 kV/2,5 mm [12]. Selanjutnya, pada penelitian yang dilakukan oleh Ronald Agustinus Sitorus pada tahun 2023 didapatkan hasil bahwa penggunaan zat aditif *butylated hydroxytoluene* pada minyak sawit mentah hanya mampu meningkatkan nilai tegangan tembus tertinggi sebesar 10.285 kV/2,5 mm[4].

Umumnya, penambahan zat aditif ini menimbulkan efek yang baik pada minyak nabati. Adapun efek tersebut yaitu dapat menurunkan nilai kekentalan (viskositas) menjadi lebih rendah. Selain itu, penambahan zat aditif ini juga dapat meningkatkan nilai tegangan tembus (*breakdown*). Dengan adanya kedua efek tersebut, maka akan menjadikan minyak nabati menjadi lebih cocok sebagai alternatif minyak isolasi. Namun, untuk mendapatkan hasil yang baik pada minyak isolasi, zat aditif yang ditambahkan harus sesuai dengan standar yang ada. Hal ini karena zat aditif juga dapat menurunkan nilai tegangan tembus jika terlalu berlebihan. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh M. Ikhsan Nurharyadi pada tahun 2021 didapatkan hasil bahwa penambahan zat aditif fenol pada minyak sawit mampu meningkatkan nilai tegangan tembus tertinggi sebesar 34.1 kV/2,5 mm dengan konsentrasi fenol sebesar 2%. Akan tetapi, nilai tegangan tembus menjadi turun ketika konsentrasi fenol lebih dari 2%, yaitu menjadi sebesar 19,7 kV/2,5 mm dan akan terus turun menjadi lebih rendah jika semakin besar konsentrasi fenol yang ditambahkan. Penurunan nilai tegangan tembus ini mungkin terjadi akibat campuran fenol sudah mencapai atau melebihi titik optimum [11]

Pada penelitian terdahulu yang telah dilakukan, penambahan zat aditif seperti fenol dan *butylated hydroxytoluene* (BHT) menghasilkan nilai tegangan tembus dan viskositas yang bervariasi. Namun, untuk jenis zat aditif *butylated hydroxyanisole* (BHA) belum terdapat penelitian terdahulu. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* (BHA) dan *butylated hydroxytoluene* (BHT) untuk mengetahui nilai viskositas dan tegangan tembus metil ester minyak sawit sebagai alternatif isolasi minyak transformator.

2.5 Tegangan Tembus

Tegangan tembus (*breakdown*) merupakan suatu peristiwa yang terjadi ketika medan magnet terus meningkat hingga atom-atom terionisasi sehingga menyebabkan isolator kehilangan sifatnya dan berubah menjadi konduktor [13]. Tegangan tembus menjadi salah satu parameter penting dalam menjadikan minyak nabati sebagai alternatif minyak isolasi transformator. Pengujian tegangan tembus pada isolasi minyak transformator dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kemampuan isolasi minyak transformator terhadap tegangan yang diberikan. Menurut IEC 156, pengujian tegangan tembus minyak isolator pada kondisi standar dilakukan dengan sepasang elektroda setengah bola berdiameter 50 mm dengan jarak sela 2,5 mm. Selanjutnya, SPLN 49-1 : 1982 menyebutkan bahwa tegangan tembus yang harus dipenuhi untuk spesifikasi minyak isolasi baru adalah sebesar $\geq 30 \text{ kV}/2,5 \text{ mm}$ [14]. minyak isolasi dikatakan baik apabila nilai tegangan tembusnya semakin tinggi. Sebaliknya, minyak isolasi dikatakan buruk atau tidak memenuhi syarat sebagai minyak isolasi apabila nilai tegangan tembusnya semakin rendah. Pada minyak nabati, nilai tegangan tembus yang dihasilkan masih dikatakan rendah, untuk itu perlu ditambahkan bahan atau zat aditif pada minyak nabati. Penambahan zat aditif ini bertujuan untuk meningkatkan nilai tegangan tembus atau memperbaiki kualitas minyak nabati sebagai alternatif minyak isolasi transformator. Hal ini dibuktikan pada penelitian yang telah dilakukan oleh Fandu Ryansyah Nasution pada tahun 2022 didapatkan bahwa nilai tegangan tembus pada minyak sawit adalah sebesar 36,2 kV/2,5 mm dengan penambahan bentonit [15].



Gambar 2.3 Skema Pengujian Tegangan Tembus[4]

2.6 Viskositas

Viskositas merupakan kekentalan dari suatu fluida yang disebabkan adanya gesekan antara molekul-molekul cairan yang menyusun fluida tersebut. Cairan fluida yang mudah untuk mengalir berarti nilai viskositasnya rendah, namun apabila cairan sulit untuk mengalir maka nilai viskositasnya tinggi [16]. Umumnya, viskositas menjadi salah satu parameter penting dalam menilai kualitas suatu minyak isolator, baik dalam upaya mencegah terjadinya kebocoran tegangan maupun *flashover*. Minyak isolasi memiliki peranan penting dalam peralatan listrik, seperti pada transformator. Selain berperan sebagai media isolasi, minyak isolasi juga berfungsi sebagai media pendingin pada transformator. Berdasarkan fungsinya sebagai media pendingin, maka nilai viskositas dari minyak isolasi tentu sangat berpengaruh. Minyak isolasi dikatakan baik apabila nilai viskositasnya semakin rendah. Hal ini baik dalam membantu dalam menghantarkan panas. Sebaliknya, minyak isolasi dikatakan buruk apabila nilai viskositasnya semakin tinggi. Nilai viskositas dari sebuah minyak isolasi yang baik diatur dalam SPLN 49-1 tahun 1982, yaitu sebesar ≤ 40 cSt pada suhu 20°C dan ≤ 12 cSt pada suhu 40°C . Umumnya, pada minyak nabati murni di segala jenis memiliki nilai viskositas yang tinggi. Nilai ini melebihi standar yang telah ditetapkan. Hal ini telah dibuktikan pada penelitian yang dilakukan oleh Alim, M. dkk. Pada tahun 2022 didapatkan bahwa nilai viskositas pada minyak nabati jarak adalah sebesar 48,70 cSt [17].

Berdasarkan tinjauan pustaka diatas, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis potensi dari metil ester minyak sawit sebagai alternatif isolasi minyak transformator. Pada penelitian ini, metil ester minyak sawit akan ditambahkan dengan zat aditif *butylated hydroxyanisole* (BHA) dan *Butylated Hydroxytoluene* (BHT). Penambahan *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* ini dilakukan dengan upaya untuk memperbaiki kelemahan yang terdapat pada minyak nabati, yaitu meningkatkan nilai tegangan tembus (*breakdown*) dan menurunkan nilai viskositas agar sesuai dengan SPLN 49-1 tahun 1982.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan dan pembuatan laporan penelitian tugas akhir ini dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Universitas Lampung, Laboratorium Analisa dan Instrumentasi Jurusan Teknik Kimia Universitas Lampung, serta PT. PLN (Persero) ULTG Tegineneng Gardu Induk Natar. Adapun waktu penelitian ini dilakukan dari bulan November 2024 – Mei 2025, dengan jadwal rincian dapat dilihat pada tabel penelitian berikut:

Gambar 3. 1 Rincian Waktu Penelitian

No	Jenis Kegiatan	Bulan						
		11	12	1	2	3	4	5
1	Studi Literatur							
2	Penulisan Proposal							
3	Seminar Proposal							
4	Penelitian							
5	Analisis Data							
6	Penulisan Laporan							
7	Seminar Hasil							
8	Seminar Komprehensif							

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Megger OTS80Af *Oil Tester*
2. Corong minyak

3. Botol
4. Jerigen
5. Termometer
6. *Stopwatch*
7. Oven
8. Minyak Sawit Mentah
9. Air akuades
10. KOH
11. H_2SO_4
12. Methanol
13. *Butylated Hydroxyanisole* (BHA)
14. *Butylated Hydroxytoluene* (BHT)
15. Gelas Ukur
16. Gelas Beaker
17. Corong Pemisah
18. Viskometer Ostwald
19. *Magnetic Stirred*
20. Kertas Lakmus
21. Buret
22. Lemari Asam
23. Desikator

3.3 Metode Penelitian

Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan pada penelitian agar penulis dapat lebih memahami mengenai tegangan tembus dan viskositas dari metil ester minyak sawit sebagai alternatif isolasi minyak transformator dengan mempelajari sekaligus mengumpulkan literatur berupa buku maupun jurnal – jurnal penelitian terdahulu yang telah dilakukan.

2. Pembuatan Minyak Sawit dengan Proses Esterifikasi

Minyak sawit mentah (*crude palm oil*) yang ada akan melalui proses esterifikasi dan transesterifikasi untuk menghasilkan metil ester. Adapun tahapan yang dilakukan dalam pembuatan metil ester minyak sawit adalah sebagai berikut:

- Proses Esterifikasi

- a. Menuangkan sebanyak 500 ml sampel minyak sawit mentah (CPO) ke dalam gelas beaker lalu dipanaskan hingga mencapai suhu 60° C menggunakan *hotplate*.
- b. Mencampurkan sebanyak 130 ml methanol dengan 5 ml H₂SO₄ lalu diaduk hingga merata.
- c. Memasukkan campuran methanol dan H₂SO₄ ke dalam sampel CPO yang telah dipanaskan hingga suhu 60° C dan diaduk dengan menggunakan *magnetic stirred* dengan kecepatan 800 rpm selama 1 jam.
- d. Memanaskan sebanyak 1000 ml air akuades dengan suhu mencapai 60° C untuk proses pencucian.
- e. Melakukan proses pencucian sampel dengan memasukkan campuran methanol dan H₂SO₄ dan minyak CPO ke dalam corong pisah. Lalu, ditambahkan air akuades yang telah dipanaskan sebanyak ±200 ml dan dicuci sebanyak 3-5 kali hingga pH netral yang dibuktikan dengan kertas lakmus.
- f. Setelah sampel minyak dicuci, lalu sampel dimasukkan ke dalam gelas beaker 500 ml dan di oven selama 6 jam. Kemudian, setelah di oven sampel minyak dimasukkan ke dalam desikator dan akan dilanjutkan dengan proses transesterifikasi [6].

- Proses Transesterifikasi

- a. Menuangkan sampel minyak hasil esterifikasi ke dalam gelas beaker lalu dipanaskan hingga mencapai suhu 60° C dengan menggunakan *hotplate*.
- b. Mencampurkan sebanyak 343 ml methanol dengan 4,5 gr KOH ke dalam minyak hasil esterifikasi yang telah dipanaskan hingga mencapai suhu 60° C, lalu diaduk dengan menggunakan *magnetic stirred* dengan kecepatan 1000 rpm selama 1 jam.

- c. Memanaskan sebanyak 1000 ml air akuades dengan suhu 60° C untuk proses pencucian.
- d. Melakukan proses pencucian sampel dengan memasukkan campuran methanol dan KOH dan minyak hasil esterifikasi ke dalam corong pisah. Lalu, ditambahkan air akuades yang telah dipanaskan sebanyak ± 200 ml dan dicuci sebanyak 3-4 kali hingga pH netral yang dibuktikan dengan kertas lakmus.
- e. Setelah sampel minyak dicuci, lalu sampel dimasukkan ke dalam gelas beaker 500 ml dan di oven selama 6 jam. Kemudian, setelah di oven, sampel minyak dimasukkan ke dalam desikator.
- f. Setelah itu, metil ester minyak sawit dimasukkan ke dalam botol untuk dilakukan pengujian.

3. Pembuatan Sampel Minyak Isolasi Esterifikasi Kelapa Sawit

Metil ester minyak sawit yang telah diperoleh selanjutnya dicampurkan dengan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene*. Adapun tahapan pencampuran zat aditif adalah sebagai berikut:

- a. Melakukan penimbangan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* dengan konsentrasi masing - masing sebesar 2,5 gr dan 5 gr, sehingga total sampel yang akan diuji sebanyak 4 sampel.
- b. Memanaskan sebanyak 500 ml metil ester minyak sawit hingga mencapai suhu 60° C.
- c. Mencampurkan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* dengan sampel metil ester minyak sawit dan diaduk secara konsisten dengan menggunakan *magnetic stirred* dengan kecepatan 800 rpm selama 20 menit [18]. Selanjutnya, sampel yang telah dilakukan pencampuran kemudian disimpan di tempat bersuhu ruang dan tidak terpapar sinar matahari.

4. Pengujian Kualitas Metil Ester Minyak Sawit

Adapun pengujian kualitas metil ester minyak sawit yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Parameter Pengujian Kualitas Metil Ester Minyak Sawit

No	Parameter Uji	Satuan	SNI
1	Masa Jenis	Kg/m ³	860-890 Kg/m ³
2	Angka asam	MgKOH/g	Maks. 0,5 MgKOH/g
3	Viskositas Kinematik	cSt	2,3 – 6,0 cSt

- Massa Jenis (Densitas)

Pengujian masa jenis atau densitas dilakukan dengan menggunakan metode *specific gravity* yaitu metode dengan melakukan pengukuran densitas metil ester dan air menggunakan piknometer. Tahapan pengujian densitas dilakukan dengan menimbang piknometer kosong yang sebelumnya sudah dioven selama 15 menit dan didiamkan 15 menit didesikator. Lalu setelah itu mengisi piknometer dengan metil ester dan menimbanginya menggunakan timbangan digital untuk mengetahui massa metil ester. Densitas metil ester dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$Densitas = \frac{m \text{ metil ester (gram)}}{V_{\text{piknometer (ml)}}} \quad (3.1)$$

Selanjutnya jika telah diketahui nilai densitas metil ester, maka tahapan selanjutnya yaitu menghitung densitas air dengan cara yang sama sebagai densitas *reference*. Untuk menghitung *specific gravity* dihitung dengan persamaan berikut:

$$specific \text{ Gravity} = \frac{\rho \text{ metil ester } (\frac{g}{ml})}{\rho \text{ air } (\frac{g}{ml})} \quad (3.2)$$

- Bilangan Asam

Pengujian bilangan asam dilakukan dengan metode titrasi menggunakan katalis basa KOH 0,1 N. Sebelum melakukan pengujian bilangan asam dilakukan standarisasi terlebih dahulu pada KOH. Standarisasi KOH dilakukan dengan

memasukkan 10 ml asam oksalat kedalam tabung *erlemeyer* dan larutkan menggunakan 25 ml akuades lalu tambahkan 3 tetes indikator PP. Setelah itu titrasi dengan KOH hingga berwarna merah muda yang tidak berubah warnanya.

Adapun langkah yang dilakukan untuk memulai pengujian yaitu menyiapkan sampel metil ester sebanyak 2 gr dan dimasukkan kedalam *erlenmeyer* 250 ml yang ditambahkan dengan ethanol sebanyak 10 ml dan 3 tetes indikator PP. Lalu dititrasi menggunakan KOH 0,1 N hingga berubah warna menjadi merah muda yang tidak berubah warnanya. Kemudian dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{bilangan asam} = \frac{mr\ KOH \times N\ KOH \times V\ KOH}{m\ \text{metil ester}} \quad (3.3)$$

- Viskositas Kinematik

Pengujian viskositas kinematik dilakukan dengan menggunakan alat uji viskositas yang bernama *viscometer otswald*. Pengujian dilakukan dengan memasukkan ± 10 ml metil ester dengan suhu 40°C kedalam alat uji. Lalu minyak dihisap menggunakan *push ball* hingga ke batas a. setelah itu melepaskan pushball dan mengukur waktu yang diperlukan minyak untuk turun dari batas a ke batas b menggunakan stopwatch. Lalu mengulangnya hingga 3 kali dan mengambil nilai rata-ratanya. Untuk menghitung nilai viskositas dapat dilihat pada persamaan:

$$\mu_{\text{metil ester}} = \frac{t_{\text{metil ester}} \times \rho_{\text{metil ester}}}{t_{\text{air}} \times \rho_{\text{air}}} \times \mu_{\text{air}} \quad (3.4)$$

5. Pengujian Tegangan Tembus (*Breakdown*)

Pengujian tegangan tembus pada metil ester minyak sawit dilakukan untuk mendapatkan nilai tegangan tembus dari minyak yang akan diuji. Pengujian tegangan tembus ini akan menggunakan alat yaitu Megger OTSAf *Oil Tester*. Pengujian tegangan tembus akan ini akan menggunakan elektroda berbentuk setengah bola dengan diameter 12,5 mm dan jarak antar elektroda yaitu sebesar 2,5 mm. Adapun standar yang akan dipergunakan adalah diatur dalam SPLN 49-1 tahun 1982 yaitu nilai tegangan tembus adalah sebesar $\geq 30\text{ kv}/2,5\text{ mm}$. Pengujian

ini dilakukan dengan menempatkan minyak yang akan diuji pada wadah pengujian hingga seluruh bagian elektroda terendam oleh minyak [19]. Alat uji akan diberikan tegangan suplai sebesar 220 V yang kemudian akan naik secara bertahap hingga mencapai nilai tegangan kV. Adapun tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

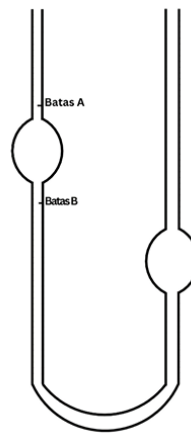
- a. Membersihkan wadah uji dengan menggunakan alkohol dan sampel minyak.
- b. Memasukkan sebanyak 400 ml sampel metil ester minyak sawit ke dalam wadah uji.
- c. Menghidupkan Megger OTSAf *Oil Tester*, lalu menghubungkannya dengan *grounding*.
- d. Memulai pengujian dengan menekan tombol *start* pada alat uji.
- e. Melihat dan mencatat hasil pengujian yang ditampilkan pada alat uji secara otomatis.
- f. Menghitung dan mengambil nilai rata-rata setiap sampel pengujian.

6. Pengujian Viskositas Kinematik

Pengujian viskositas pada metil ester minyak sawit dilakukan untuk mengetahui tingkat kekentalan pada minyak dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene*. Pengujian viskositas dilakukan untuk mengetahui efek dari penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* terhadap nilai kekentalan dari metil ester minyak sawit yang di uji. Adapun nilai yang ditetapkan oleh SPLN 49-1 tahun 1982 yaitu bernilai sebesar 40 cSt pada suhu 20°C dan sebesar ≤ 12 cSt pada suhu 40°C. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat yaitu Viskometer Ostwald. Metode pengukuran dengan menggunakan viskometer Ostwald ini yaitu dengan cara mengukur lama waktu yang dibutuhkan minyak dari batas a hingga mencapai batas b seperti pada gambar 3.1. Adapun tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Memasukkan sebanyak ± 10 ml sampel minyak yang telah dipanaskan hingga mencapai suhu 40° C ke dalam viskometer secara perlahan.
- b. Memasang bola penghisap (*pushball*) pada lubang viskometer dan hisap minyak hingga mencapai batas a.

- c. Melepaskan bola penghisap (*pushball*) sehingga metil ester minyak sawit akan mulai turun hingga mencapai batas b.
- d. Lalu, mengukur waktu yang diperlukan metil ester minyak sawit untuk dapat turun dari batas a hingga mencapai batas b dengan menggunakan *stopwatch* dan mencatat waktunya.
- e. Proses ini akan dilakukan berulang sebanyak 3 kali dan kemudian dilakukan perhitungan nilai rata – rata waktu dari 3 kali percobaan tersebut. Kemudian, hasil perhitungan akan digunakan untuk menghitung seberapa besar nilai viskositas yang didapatkan dari sampel metil ester minyak sawit.



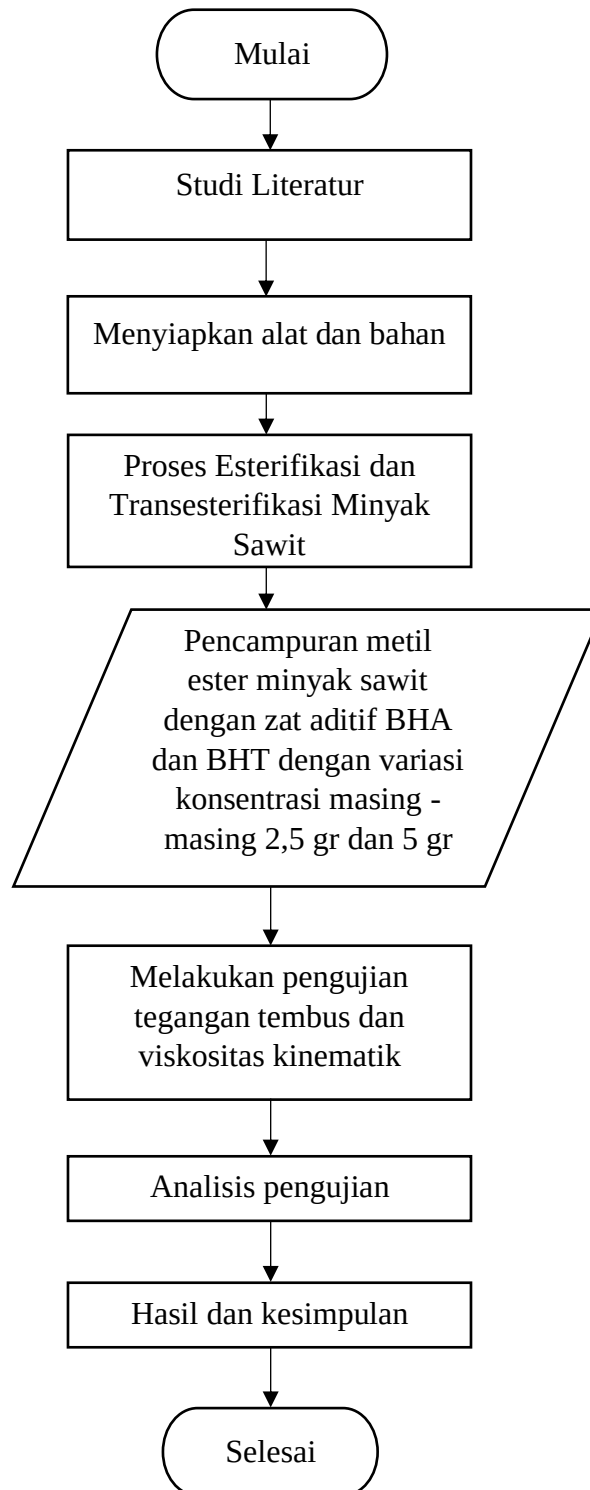
Gambar 3.2 Viskometer Ostwald [4]

7. Analisis Data dan Penyusunan Laporan

Analisis data dilakukan terhadap data yang diperoleh dari hasil pengujian. Kemudian data tersebut akan diolah untuk selanjutnya dilakukan pembahasan mengenai data hasil pengujian untuk mencapai tujuan dari penelitian ini. Lalu, hasil penelitian akan disajikan dalam bentuk laporan akhir yang berisikan analisa data penelitian, serta laporan akhir ini akan digunakan sebagai bentuk tanggung jawab penulis terhadap tugas akhir yang telah dilaksanakan.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Nilai viskositas dari pengujian pada metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* dengan konsentrasi penambahan masing – masing sampel sebesar 2,5 gr dan 5 gr sudah memenuhi standar SPLN 49-91 : 1982 dimana nilai viskositas pada minyak isolasi transformator yaitu sebesar ≤ 12 cSt pada suhu 40° C. Nilai viskositas yang didapatkan pada metil ester minyak sawit dengan *butylated hydroxyanisole* diperoleh secara berturut – turut sebesar 5,32 cSt dan 5,44 cSt, sedangkan dengan *butylated hydroxytoluene* secara berturut – turut sebesar 5,44 cSt dan 5,56 cSt.
2. Nilai tegangan tembus dari metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* dengan konsentrasi penambahan masing – masing sampel sebesar 2,5 gr dan 5 gr mengalami kenaikan seiring dengan naiknya penambahan konsentrasi. Akan tetapi, hanya penggunaan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dengan konsentrasi 5 gr saja yang memenuhi standar SPLN 49-91 : 1982 yaitu sebesar ≥ 30 kV, dimana nilai yang diperoleh adalah sebesar 37,4 kV.
3. Berdasarkan data hasil pengujian nilai viskositas dan tegangan tembus pada penelitian ini didapatkan bahwa metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif *butylated hydroxyanisole* dan *butylated hydroxytoluene* memiliki hubungan yang berbanding lurus dimana nilai viskositas dan tegangan tembus sama – sama mengalami kenaikan seiring dengan penambahan konsentrasi.

5.2 SARAN

Adapun saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya sampel minyak sawit mentah (CPO) yang akan digunakan sebaiknya tidak disimpan di tempat yang memiliki suhu yang berubah – ubah untuk menghindari naiknya angka asam pada minyak CPO.
2. Pada penelitian selanjutnya melakukan pengujian FFA terlebih dahulu pada minyak sawit mentah (CPO) sebelum diproses menjadi metil ester.
3. pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan menggunakan sampel metil ester minyak sawit yang lebih banyak dan bervariasi agar dapat melihat pengaruh yang timbul dengan penambahan zat aditif yang digunakan.
4. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian terhadap parameter – parameter lainnya yang tidak dilakukan pada penelitian ini, seperti kadar ester, titik didih, dan titik beku pada metil ester minyak sawit.
5. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan analisis mengenai oksidasi saat pengujian tegangan tembus dan dilakukan uji fisik maupun kimia terhadap zat aditif yang digunakan.
6. Pada penelitian selanjutnya proses esterifikasi dan transesterifikasi dapat dilakukan dengan menggunakan katalis lainnya yang tidak ada di penelitian ini.
7. Pada penelitian selanjutnya lebih memperhatikan secara detail terkait bahan kimia yang akan digunakan pada proses pembuatan metil ester minyak sawit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Marsudi, P. Generator, and B. Tobing, "Peralatan Tegangan tinggi," *Pembangkitan Energi Listrik*, vol. 7, no. 1, pp. 4–31, 2016.
- [2] A. Rajab, H. Yestian, R. M. Pradipta, and T. U. Septiyeni, "Pengembangan Minyak Isolasi Transformator Ramah Lingkungan dan Terbarukan Dari Etil Ester," *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, vol. 8, no. 1, p. 22, 2022.
- [3] A. Rajab, A. Pawawoi, A. Sulaeman, and D. Mujahidin, "Studi Penggunaan Metil Ester Minyak Sawit Sebagai Minyak Isolasi Peralatan Listrik," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2014.
- [4] R. A. Sitorus, "Uji Tegangan Tembus dan Viskositas Minyak Sawit dengan Penambahan Butylated Hydroxytoluene (BHT) Sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator," Skripsi, Teknik Elektro Universitas Lampung, 2024.
- [5] A. Amalia, J. Pratilastiarso, and dan Eka Siti Nur Laili, "Produksi Metil Ester Menggunakan Nanokatalis Heterogen," *Journal of Research and Technology*, vol. VII, pp. 113–122, 2021.
- [6] M. Alifiah, "Pembuatan dan Pengujian Minyak Metil Ester Biji Karet Sebagai Isolasi Transformator Tegangan Tinggi," Skripsi, Teknik Elektro Universitas Lampung, pp. 1–50, Nov. 2019.
- [7] E. Lotero, Y. Liu, D. E. Lopez, K. Suwannakarn, D. A. Bruce, and J. G. Goodwin, "Synthesis of biodiesel via acid catalysis," *Ind Eng Chem Res*, vol. 44, no. 14, pp. 5353–5363, Jul. 2005.
- [8] P. Kampar, J. K. Tengku Muhammad, B. Belah, K. Bangkinang, and K. Kampar, "Sintesis Metil Ester Sulfonat dari Sulfonasi Metil Ester Minyak Sawit dengan Agen Na₂S₂O₅ Nur Asma Deli," *Journal on Education*, vol. 05, no. 03, 2023.
- [9] N. Fitri, "Butylated hydroxyanisole sebagai Bahan Aditif Antioksidan pada Makanan dilihat dari Perspektif Kesehatan," *Jurnal Kefarmasian Indonesia*, vol. 4, no. 1, pp. 41–50, 2013.
- [10] O. Aldianto and W. Ramadhan, "Kinerja Dielektrik Minyak Goreng Kelapa Sawit dengan Aditif Fenol Sebagai Alternatif Isolasi Cair Transformator Daya," Skripsi, Teknik Elektro Universitas Jember, 2019.

- [11] M. I. Nurharyadi, "Analisis Pengaruh Konsentrasi Fenol Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit," Skripsi, Teknik Elektro Universitas Brawijaya, 2021.
- [12] A. Firmansyah, "Analisis Pengaruh Aditif Bht Terhadap Karakteristik Minyak Kemiri Sunan Sebagai Alternatif Isolasi Cair Transformator Daya," Skripsi, Teknik Elektro Universitas Jember, 2019.
- [13] S. N. Singgih dan H. Berahim, "Analisis Pengaruh Keadaan Suhu Terhadap Tegangan Tembus AC dan DC Pada Minyak Transformator," Jurnal Teknik Elektro vol. 1, no. 2, pp. 11-28, 2016.
- [14] H. Taufik Kurrahman and S. Abduh, "Studi Tegangan Tembus Minyak Kemiri Sunan Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Transformator Daya," vol. 13, no. 2, pp. 11–28, 2016.
- [15] F. R. Nasution, "Analisis Tegangan Tembus Crude Palm Oil dengan Penambahan Bentonit dan Zeolit Teraktivasi Sebagai Alternatif Isolator Cair," Skripsi, Teknik Elektro Universitas Lampung, 2023.
- [16] M. K. Putri *et al.*, "Analisis Nilai Kecepatan Terhadap Viskositas Pada Fluida," Jurnal Pendidikan Fisika, vol. 8, no. 1, pp. 89-96, 2024.
- [17] M. Alim, A. Gunawan, L. M. K. Amali, and A. I. Tolago, "Uji Kelayakan Minyak Jarak Sebagai Bahan Isolasi Cair Pada Transformator," vol. 11, no. 2, pp. 41-45, 2022.
- [18] A. Raymon, P. Pakianathan, M. P. E. Rajamani, and R. Karthik, "Enhancing the critical characteristics of natural esters with antioxidants for power transformer applications," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 3, pp. 899–912, 2013.
- [19] A. Raymon, P. Pakianathan, M. P. E. Rajamani, and R. Karthik, "Investigation Of Vegetable Oil Blended With Antioxidant." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015.
- [20] S. Senthil Kumar, M. Willjuice Iruthayarajan, M. Bakruthen, and S. G. Kannan, "Effect of Antioxidants on Critical Properties of Natural Esters for Liquid Insulations," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, No. 4, Aug. 2016.