

**ANALISIS PENGUJIAN TEGANGAN TEMBUS DAN VISKOSITAS
METIL ESTER MINYAK SAWIT DENGAN PENAMBAHAN
ASCORBIC ACID (AA) DAN *TERTIARY BUTYLHYDROQUINONE*
(TBHQ) SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI MINYAK
TRANSFORMATOR**

(Skripsi)

Oleh

**Serly Ulya Wardani
NPM 2115031019**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS PENGUJIAN TEGANGAN TEMBUS DAN VISKOSITAS METIL ESTER MINYAK SAWIT DENGAN PENAMBAHAN *ASCORBIC ACID* (AA) DAN *TERTIARY BUTYLHYDROQUINONE* (TBHQ) SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI MINYAK TRANSFORMATOR

Oleh

SERLY ULYA WARDANI

Salah satu komponen penting dalam kinerja transformator adalah minyak isolasi yang umumnya menggunakan minyak mineral. Namun minyak mineral memiliki sifat tidak dapat diperbaharui untuk pemakaian terus menerus sehingga diperlukan solusi untuk mengatasi hal tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengubah minyak sawit menjadi metil ester minyak sawit lalu menambahkan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ). Proses mengubah metil ester minyak sawit melalui dua tahapan, yaitu esterifikasi menggunakan perbandingan mol minyak dan methanol sebesar 1:6 dengan katalis H_2SO_4 1% dan transesterifikasi menggunakan perbandingan mol minyak dan methanol sebesar 1:20 dengan katalis KOH 1%. Lalu pada penambahan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ) digunakan variasi konsentrasi 2,5 gram dan 5 gram yang dicampurkan dengan kecepatan pengadukan 800 rpm selama 1 jam. Hasil pengujian kualitas metil ester minyak sawit menunjukkan nilai massa jenis dan viskositas yang memenuhi standar, sedangkan bilangan asam belum memenuhi SNI 7182:2015. Setelah pencampuran minyak dengan zat aditif dilakukan pengujian pengujian viskositas, didapatkan data hasil pada AA secara berturut sebesar 5.28 cSt dan 5.18 cSt, sedangkan pada TBHQ secara berturut sebesar 5.66 cSt dan 5.67 cSt yang memenuhi standar SPLN 49-1 sebagai minyak isolasi transformator. Lalu dilakukan pengujian tegangan tembus dan didapatkan hasil yaitu pada AA secara berturut sebesar 17 kV dan 18.4 kV, sedangkan pada TBHQ secara berturut sebesar 18,2 kV dan 24,5 kV yang belum memenuhi standar SPLN 49-1.

Kata kunci : Minyak isolasi, Minyak sawit, metil ester, esterifikasi, transesterifikasi.

ABSTRACT

ANALYSIS OF DIELECTRIC STRENGTH AND VISCOSITY TESTING OF PALM OIL METHYL ESTERS WITH THE ADDITION OF ASCORBIC ACID (AA) AND TERTIARY BUTYLHYDROQUINONE (TBHQ) AS AN ALTERNATIVE FOR TRANSFORMER OIL INSULATION

By

SERLY ULYA WARDANI

One of the important components in transformer performance is insulating oil, which generally uses mineral oil. However, mineral oil has properties that cannot be renewed for continuous use, so a solution is needed to overcome this problem. This study aims to convert palm oil into palm oil methyl ester and then add the additives ascorbic acid (AA) and tertiary butylhydroquinone (TBHQ). The process of converting palm oil methyl ester involves two stages: esterification using a molar ratio of oil to methanol of 1:6 with a catalyst of H_2SO_4 1%, and transesterification using a molar ratio of oil to methanol of 1:20 with a catalyst of KOH 1%. Then, when adding the additives Ascorbic Acid (AA) and Tertiary Butylhydroquinone (TBHQ), variations in concentration of 2.5 grams and 5 grams were used, mixed at a stirring speed of 800 rpm for 1 hour. The quality testing results of the palm oil methyl ester showed density and viscosity values that met the standards, while the acid number did not meet SNI 7182:2015. After mixing the oil with the additives, viscosity testing was conducted, yielding results of 5.28 cSt and 5.18 cSt for AA, and 5.66 cSt and 5.674 cSt for TBHQ, which met the SPLN 49-1 standard for transformer insulation oil. Then, a breakdown voltage test was conducted, yielding results of 17 kV and 18.4 kV for AA and 18.2 kV and 24.5 kV for TBHQ, which did not meet the SPLN 49-1 standard.

Keywords: *Insulating oil, Palm oil, Methyl ester, Esterification, Transesterification.*

**ANALISIS PENGUJIAN TEGANGAN TEMBUS DAN VISKOSITAS
METIL ESTER MINYAK SAWIT DENGAN PENAMBAHAN
ASCORBIC ACID (AA) DAN *TERTIARY BUTYLHYDROQUINONE*
(TBHQ) SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI MINYAK
TRANSFORMATOR**

Oleh

SERLY ULYA WARDANI

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 PENGUJIAN TEGANGAN TEMBUS
DAN VISKOSITAS METIL ESTER MINYAK
SAWIT DENGAN PENAMBAHAN ASCORBIC
ACID (AA) DAN TERTIARY
BUTYLHYDROQUINONE (TBHQ) SEBAGAI
ALTERNATIF ISOLASI MINYAK
TRANSFORMATOR**

Nama Mahasiswa

: **Serly Ulya Wardani**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115031019

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

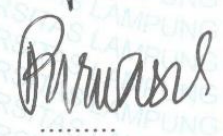
Ketua : Dr. Herman Halomoan S, S.T,M.T.



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



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

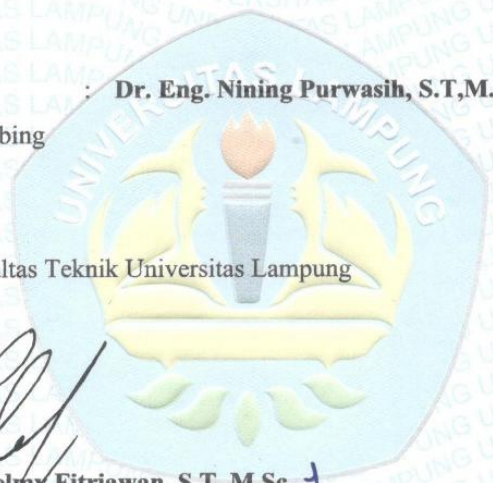


Bukan Pembimbing

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 di bawah ini:

Nama : Serly Ulya Wardani

NPM : 2115031019

Jurusan : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sungguh-sungguh, bahwa skripsi saya yang berjudul:

“Pengujian Tegangan Tembus dan Viskositas Metil Ester Minyak Sawit Dengan Penambahan Zat Aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ) Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Isolasi Transformator”

Adalah benar karya saya sendiri yang saya susun dengan mengikuti norma dan etika akademik yang berlaku. Selanjutnya, apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 30 Juni 2025

Yang membuat pernyataan



Serly Ulya Wardani

NPM 2115031019

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Serly Ulya Wardani, biasa dipanggil dengan sebutan Serly, dilahirkan di Bagelen pada tanggal 26 Oktober 2003 sebagai anak pertama dari 2 bersaudara, dari pasangan Bapak Supomo dan Ibu Sri Wahyuni. Penulis memiliki adik laki-laki bernama M Tryofan Agung Pratama. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari TK Dharma Wanita Bagelen pada tahun 2008 hingga 2009. SDN 7 Gedongtataan pada tahun 2009 hingga 2015. SMPN 1 Pesawaran pada tahun 2015 hingga 2018. Kemudian SMAN 1 Gedongtataan pada 2018 hingga 2021. Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2021 melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN)

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif mengikuti kegiatan dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) sebagai anggota Departemen Sosial dan Kewirausahaan selama periode 2022-2023 dan menjadi bagian dari asisten Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi dari tahun 2024 dan berkesempatan menjadi asisten Praktikum Teknik Tegangan Tinggi pada tahun 2024. Pada bulan Januari-Februari 2024 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) selama 40 hari di Desa Simpang Pematang, Kecamatan Simpang Pematang Kabupaten Mesuji. Dalam kegiatan KKN tersebut penulis terlibat dalam program pemberdayaan masyarakat yang kemudian berhasil dipublikasikan dalam karya ilmiah yang berjudul “Pemberdayaan Komunitas-Komunitas Perempuan di Desa Simpang Pematang Kabupaten Mesuji”. Pada bulan Juli-Agustus penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) selama 40 hari di PT.PLN (Persero) ULTG Pagelaran dan berhasil menyelesaikan laporan akhir yang berjudul “Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga (PMT) pada Bay Penghantar Natar 1 di Gardu Induk Langkapura 150 kV”.

Kupersembahkan skripsi ini untuk kedua orang tuaku tercinta,

“Bapak Supomo dan Ibu Sri Wahyuni”

*Yang tak pernah lelah memberi tanpa meminta, yang doanya menjadi
pelindung dalam diam,*

dan kasih sayangnya tak pernah habis meski tak selalu terucap.

*Terimakasih telah menjadi tempat paling sabar untuk pulang, menjadi
semangat saat semangatku mulai runtuh,*

dan menjadi alasan mengapa aku terus melangkah sejauh ini.

MOTTO

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar.”

(Qs. Ar-Ruum:60)

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya. Dia tidak mendapat (pahala) dari (kebajikan) yang dikerjakannya dan dia mendapat (siksa) dari (kejahatan) yang diperbuatnya.”

(Qs. Al-Baqarah :286)

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”

(Qs. Al-Insyirah:5)

“Hasbunallah wa ni’mal wakil ni’mal maula wa ni’mal nasir”

“Lailaha illa anta subhanaka inni kuntu minadzalimin”

“Allahumma yassir wala tu’asir robbi tammim bil khoir”

“Apapun yang terjadi, tetaplah bernafas”. - JKL

“Porsi manusia itu beda-beda. Beruntungnya beda, sedihnya beda, masalahnya beda, cobaannya beda, gaada berat dan ringan. Semua dipikul sesuai pundak masing-masing. Karena setiap yang bernyawa punya lintasan hidup yang berbeda-beda. Ada yang sudah sampai, ada yang baru memulai, ada yang sudah berhasil, ada pula yang sedang menunggu hasil. Kita punya kendala, tapi semesta punya kendali. Semoga kita diberikan yang terbaik di jalan kita masing-masing.

Aamiin.” -Anon

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisis Pengujian Tegangan Tembus dan Viskositas Metil Ester Minyak Sawit Dengan Penambahan Zat Aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ) Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Isolasi Transformator” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Selesainya penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis bermaksud untuk menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala nikmat, karunia, rahmat serta hidayah-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusimeilia Afriani, D.E.A.,IPM.,ASEAN.Eng. selaku rektor Universitas Lampung.
3. Bapak Dr.Eng.Ir. Helmy Fitriawan,S.T.,M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Herman Halomoan S, S.T.,M.T. selaku dosen pembimbing utama atas waktu, tenaga, dan pikiran yang diluangkan untuk membimbing penulis. Terimakasih atas setiap arahan, ilmu, bimbingan, saran serta masukan yang diberikan kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi.
6. Ibu Dr. Eng. Diah Permata, S.T.,M.T. selaku dosen pembimbing kedua atas waktu, tenaga, dan pikiran yang diluangkan untuk membimbing penulis.

Terimakasih atas setiap arahan, ilmu, bimbingan, saran serta masukan yang diberikan kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi.

7. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T.,M.T selaku dosen penguji atas kritik, saran, masukan serta motivasi yang diberikan kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi.
8. Bapak Dr. Lukmanul Hakim, S.T.,M.Sc. selaku dosen pembimbing akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, saran serta masukan kepada penulis selama perkuliahan.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu dan pengajaran serta motivasi selama perkuliahan.
10. Staf administrasi Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam mengurus administrasi yang diperlukan selama perkuliahan.
11. Bapak Eko Prastyo selaku Supervisor HAR GI ULTG Tegineneng yang sudah banyak membantu penulis dalam proses penyelesaian skripsi.
12. Ibu Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T.,M.T. selaku Dosen Kepala Laboratorium Analisa dan Instrumentasi Teknik Kimia Universitas Lampung yang sudah banyak memberikan bantuan, arahan dan bimbingan kepada penulis selama pengerjaan skripsi.
13. Teruntuk kedua orang tua penulis, support sistem terbaik juga panutan Bapak Supomo dan Ibu Sri Wahyuni yang selalu menjadi motivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terimakasih penulis ucapkan atas segala pengorbanan dan ketulusan yang diberikan, kasih sayang yang tak pernah henti dicurahkan, serta segala doa dan usaha yang tak pernah henti dipanjatkan. Membantu, mendukung baik secara moril maupun materil, selalu mengusahakan segala yang terbaik bagi penulis serta memprioritaskan pendidikan dan kebahagiaan anak-anaknya. Dengan adanya skripsi ini penulis harap dapat membuat Bapak dan Ibu bangga karena telah berhasil menjadikan anak pertamanya ini menyandang gelar sarjana. Besar harapan penulis semoga Bapak dan Ibu selalu sehat, panjang umur dan dapat menyaksikan keberhasilan lainnya yang akan penulis raih di kemudian hari.

14. Adik laki-laki penulis, M Tryofan AP yang selalu menghibur penulis dan menjadi semangat bagi penulis untuk terus menjadi lebih baik lagi dan lagi. Terimakasih atas keceriaan dan celetukan yang sering kali menjadi penyegar di tengah Lelah. Semoga kelak, langkah penulis dapat menjadi alasanmu untuk terus maju.
15. Regita Nava sosok tidak sedarah namun seperti keluarga bagi penulis. Terimakasih untuk semua hal yang sudah dilalui, selalu ada disaat penulis membutuhkan dan tidak meninggalkan penulis dalam keadaan apapun. Terimakasih untuk motivasi, arahan serta ocehan yang mengarahkan penulis untuk menjadi lebih baik.
16. Kepada keluarga “Kuliah Buat Lulus” yaitu Ananda Saputri, Dona Eliza, Mahendra Panca, Eikel Suranta dan Fawwaz Islam atas setiap bantuan yang diberikan, waktu yang diluangkan, momen tak terlupakan, dukungan, motivasi, serta pengalaman baru bagi penulis selama perkuliahan.
17. Rijal Mahmud Wahyudi teman seperbimbingan skripsi penulis, terimakasih atas bantuan, diskusi dan kerja sama yang baik dari awal hingga selesainya penyusunan skripsi ini.
18. Teruntuk keluarga besar TTT, Asisten 2021 (Rika, Rispeb, Afdhal, Fikri, Yozi, Mahen, Rijal) atas waktu, kerjasama dan pengalaman baru bagi penulis menjadi Asisten Laboratorium serta seluruh Asisten 2022 dan juga Pak Sugi atas bantuan, doa dan semangat kepada penulis. Ucapan khusus terimakasih kepada Kak Ronald yang sudah banyak membantu dan memberikan ilmu, saran masukan serta arahan bagi penulis dalam proses pengerjaan skripsi.
19. Seluruh teman-teman TTL 2021, terkhusus teman-teman “Workshop Konversi” (Siti, Jepri, Ruli, Piz, Luki, Bimo, Ben, Daniel, Alex, Deni, Unedo, Jamed) yang sudah kebersamai penulis di akhir semester ini, terimakasih atas segala bantuan, masukan, saran serta motivasi yang diberikan kepada penulis.
20. Teman-teman penulis, teman SMA (Dinda Citra, Widya Anisa, Aniz Nur dan Shindy Martha) serta Griya Agung Geng (Napah, Julia, dan Ayel) atas bantuan, dukungan semangat serta motivasi yang diberikan kepada penulis.
21. Kak Heru, Kak Azzam, Kak Irma, Puji, Ubit, Wahid serta seluruh teman-teman dan kakak-kakak Laboratorium Analisa dan Instrumentasi Teknik Kimia yang

telah membantu tenaga, meluangkan waktu dan memberikan ilmunya dalam proses penelitian skripsi penulis.

22. Segenap Keluarga Besar Angkatan 2021 (EXCALTO) dan keluarga besar Himatro Universitas Lampung.
23. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu oleh penulis yang telah banyak membantu dalam proses penelitian dan penyusunan skripsi secara langsung maupun tidak langsung.
24. Terakhir, penulis sampaikan terimakasih kepada diri sendiri. Terimakasih atas kesediaannya untuk tetap bertahan sejauh ini, walaupun ditengah perjalanan sering kali merasa lelah dan ragu saat segala sesuatu tidak berjalan sesuai harapan. Terimakasih telah memilih untuk tetap melanjutkan langkah, walau tak selalu yakin akan hasil akhirnya namun tetap menjalaninya dengan penuh usaha dan tekad yang kuat. Terimakasih telah percaya bahwa setiap usaha dan hal sekecil apapun berarti. Terimakasih sebesar-besarnya yang kesekian kali karena telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai. Teruslah menikmati setiap proses dalam hidup, semoga setiap langkah selalu ditemani takdir yang bersabakat dan harapan yang tak pernah lelah berjalan.

Penulis menyadari laporan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Untuk itu, dalam menyempurnakan laporan skripsi ini penulis menerima kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak. Akhir kata penulis berharap laporan skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi kita semua.

Bandar Lampung, 30 Juni 2025

Penulis,

Serly Ulya Wardani

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang dan Masalah	1
1.2 Rumusan Penelitian.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Minyak Isolasi Transformator	6
2.2 Minyak Nabati Sebagai Minyak Isolasi Transformator	7
2.3 Reaksi Esterifikasi dan Transesterifikasi.....	10
2.4 Zat Aditif	12
2.5 Viskositas	13
2.6 Tegangan Tembus	14
III. METODE PENELITIAN.....	16
3.1 Waktu dan Tempat	16
3.2 Bahan dan Alat	16
3.3 Metode Penelitian.....	17
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	23

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	24
4.1 Pembuatan Metil Ester Minyak Sawit.....	24
4.1.1 Proses Esterifikasi	24
4.1.2 Proses Pencucian I.....	26
4.1.3 Proses Transesterifikasi.....	27
4.1.4 Proses Pencucian II	29
4.1.5 Proses <i>Drying</i>	30
4.1.6 Uji Kualitas Metil Ester Minyak Sawit.....	32
4.2 Penambahan Zat Aditif.....	32
4.3 Pengujian Tegangan Tembus	34
4.5 Pengujian Viskositas Metil Ester Minyak Sawit	37
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	40
5.1 KESIMPULAN	40
5.2 SARAN.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	42
LAMPIRAN.....	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Dasar Trigliserida Minyak Nabati (ester alami)[16]	10
Gambar 2. 2 Rantai Kimia Metil Ester[16]	10
Gambar 2. 3 Reaksi Esterifikasi[15]	10
Gambar 2. 4 Rangkaian Pengujian Tegangan Tembus Minyak Transformator [26]	15
Gambar 3. 1 Viscometer Ostwald	22
Gambar 4. 1 (a) Sampel sebelum ditambahkan methanol (b) Sampel sesudah ditambahkan methanol	26
Gambar 4. 2(a) Proses Pencucian Metil Ester (b) Hasil setelah didiamkan.....	27
Gambar 4. 3 (a) Sebelum ditambahkan methanol (b) Sesudah ditambahkan methanol.....	28
Gambar 4. 4 (a) Pemanasan Akuades (b) Proses Pencucian.....	29
Gambar 4. 5 (a) Pengovenan Minyak (b) Minyak dalam Desikator	30
Gambar 4. 6 Hasil Metil Ester Minyak Sawit	31
Gambar 4. 7 Proses Pencampuran Zat Aditif dengan Metil Ester Minyak Sawit.	33
Gambar 4. 8 Hasil Pencampuran Zat Aditif Dengan Metil Ester	34
Gambar 4. 9 Hasil Pengujian Tegangan Tembus Metil Ester Minyak Sawit	36
Gambar 4. 10 Pengujian Viskositas	37
Gambar 4. 11 Hasil Pengujian Viskositas Metil Ester Minyak Sawit	38

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1Jadwal Penelitian.....	16
Tabel 3. 2 Parameter Uji Kualitas Metil ester.....	19
Tabel 4. 1 Persentase Hasil Metil Ester yang Dihasilkan	31
Tabel 4. 2 Hasil Uji Kualitas Metil Ester Minyak Sawit	32
Tabel 4. 3 Variasi Konsentrasi Zat Aditif yang Dicampurkan dengan Meti Ester Minyak Sawit	33
Tabel 4. 4 Pengujian Tegangan Tembus Metil Ester Minyak Sawit.....	35
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Viskositas Metil Ester Minyak Sawit	38

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Transformator adalah perangkat listrik yang memiliki fungsi sebagai pengubah tegangan yaitu menaikkan tegangan atau menurunkan tegangan listrik sesuai dengan kebutuhan. Transformator adalah bagian penting dalam proses pendistribusian energi listrik. Dalam kinerjanya transformator harus dipastikan handal dan dalam memastikan kinerjanya tetap handal salah satu bagian penting yang harus diperhatikan yaitu minyak isolasi transformator. Transformator menggunakan bahan isolasi cair berupa minyak yang berfungsi untuk mengisolasi dan mendinginkan transformator[1]. Minyak isolasi yang umum digunakan dalam transformator adalah minyak mineral.

Minyak mineral merupakan minyak yang terbuat dari pengolahan minyak bumi yang diproses secara destilasi sehingga mendapatkan hasil ketahanan isolasi yang baik, stabilitas panas yang baik serta rendah viskositas[2]. Minyak mineral memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan sebagai bahan isolasi minyak transformator. Kelebihannya yaitu minyak mineral memiliki nilai tegangan tembus yang tinggi, nilai dielektrik yang rendah serta memiliki jangka waktu yang lama dalam penggunaannya. Namun, diantara kelebihanannya minyak mineral memiliki kekurangan yaitu minyak mineral terbuat dari bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui sehingga ketersediannya akan habis di masa yang akan datang dan tidak dapat terurai secara alami. Untuk itu diperlukan solusi alternatif lain untuk menggantikan minyak mineral sebagai pengganti minyak transformator salah satunya yaitu dengan minyak nabati.

Minyak nabati merupakan minyak yang dihasilkan dari beberapa tumbuhan antara lain kedelai, kelapa sawit, dan biji bunga matahari. Salah satu jenis minyak nabati

yang mudah didapatkan yaitu minyak sawit yang berasal dari kelapa sawit. Minyak sawit memiliki kelebihan yang menjadikannya sebagai alternatif pengganti minyak mineral sebagai minyak isolasi transformator yaitu minyak sawit merupakan sumber daya terbarukan, akomodasi kelapa sawit di Indonesia juga sangat berlimpah, untuk itu ketersediaan bahan baku bukan menjadi masalah[3]. Minyak sawit juga memiliki sifat *biogradable*[4]. Namun, minyak sawit memiliki kekurangan yang perlu diperhatikan lebih lanjut, yaitu minyak sawit memiliki masalah pada nilai viskositas yang tinggi, stabilitas oksidasi pada minyak sawit relatif rendah dan nilai tegangan tembus yang belum sesuai standar minyak isolasi transformator[4]. Untuk itu diperlukan solusi untuk mengatasi hal tersebut, penelitian lebih lanjut tentang penambahan zat aditif dilakukan untuk melihat apakah dengan penambahan zat aditif pada minyak nabati dapat menjadi solusi untuk mengatasi standar isolasi minyak transformator yang belum terpenuhi. Terdapat banyak jenis zat aditif diantaranya yaitu *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ). Pada penelitian didapatkan hasil bahwa antioksidan yang paling efektif menurunkan viskositas adalah TBHQ[5].

Penelitian ini membahas tentang pengolahan minyak sawit menjadi metil ester melalui proses esterifikasi dan penambahan zat aditif. Zat aditif yang digunakan pada penelitian yaitu *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ). Sedangkan parameter yang dianalisis dari metil ester minyak sawit diantaranya yaitu pengujian kualitas metil ester minyak sawit, pengujian nilai tegangan tembus dan viskositas. Minyak sawit yang dihasilkan diharapkan dapat memenuhi syarat sebagai pengganti minyak mineral sebagai isolasi transformator.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana proses pembuatan dan kualitas metil ester minyak sawit.
2. Bagaimana proses pencampuran metil ester dengan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ).
3. Bagaimana proses pengujian metil ester minyak sawit.

4. Bagaimana pengaruh penambahan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ) pada metil ester minyak sawit terhadap nilai viskositas dan tegangan tembus.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memproses minyak sawit menjadi metil ester minyak sawit.
2. Menguji dan menganalisis kualitas metil ester minyak sawit dengan parameter massa jenis, bilangan asam dan viskositas kinematik.
3. Menguji parameter tegangan tembus, dan viskositas dari metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ).
4. Menganalisis apakah dengan penambahan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ)) dapat menurunkan nilai viskositas dan menambah nilai tegangan tembus metil ester minyak sawit yang sesuai dengan standar minyak isolasi.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pengolahan metil ester melalui proses esterifikasi hanya menggunakan katalis asam H_2SO_4 . dan proses transesterifikasi menggunakan katalis basa KOH.
2. Tidak melakukan uji sifat fisik dan kimia pada zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ) yang digunakan.
3. Tidak melakukan analisis reaksi kimia pada metil ester minyak sawit setelah penambahan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ).
4. Pengujian yang dilakukan hanya menguji nilai tegangan tembus dan viskositas setelah ditambahkan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ) pada metil ester minyak sawit sesuai standar SPLN 49-1:1982.
5. Tidak memperhatikan oksidasi terhadap metil ester saat pengujian tegangan tembus.

6. Tidak mempertimbangkan adanya zat pengotor yang tidak dapat terlihat pada media penyimpanan maupun sampel metil ester minyak sawit.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah diharapkan dapat memproses minyak sawit menjadi metil ester dengan penambahan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ) yang memiliki nilai kekentalan dan tegangan tembus yang sesuai dengan syarat sebagai alternatif minyak isolasi transformator.

1.6 Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini adalah dengan mengubah minyak sawit menjadi metil ester kemudian menambahkan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ) dapat memperbaiki nilai viskositas dan tidak memperburuk tegangan *breakdown* yang menjadikan metil ester minyak sawit layak digunakan sebagai minyak isolasi transformator.

1.7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan laporan adalah sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

Pada bab berikut berisikan mengenai latar belakang, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab berikut berisikan mengenai tinjauan pustaka berisikan teori – teori yang dijadikan landasar dasar dalam pengerjaan skripsi ini.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab berikut berisikan mengenai informasi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, serta langkah – langkah pelaksanaan penelitian ini.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab berikut berisikan hasil penelitian serta analisis terhadap hasil yang diperoleh pada saat pengujian sampel minyak sawit dengan penambahan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ). Analisis dilakukan pada hasil pengujian tegangan tembus, dan viskositas dari minyak sawit dengan tambahan zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ).

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab berikut berisikan kesimpulan yang didapatkan dari penelitian serta saran – saran mengenai pengembangan serta perbaikan penelitian yang lebih lanjut sehingga dapat dihasilkan hasil pengujian yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

Minyak isolasi transformator yang umum digunakan saat ini yaitu jenis minyak mineral. Penggunaan minyak mineral sebagai minyak isolasi transformator memiliki beberapa kekurangan yaitu minyak mineral tidak ramah terhadap lingkungan karena sulit terurai secara alami. Ketersediaan minyak mineral juga menjadi tantangan di masa yang akan datang karena bahan baku yang tidak dapat diperbaharui. Pada penelitian ini dibahas mengenai minyak nabati dengan penambahan zat aditif untuk mengetahui kelayakan minyak nabati sebagai alternatif minyak isolasi transformator.

2.1 Minyak Isolasi Transformator

Minyak isolasi merupakan salah satu elemen penting dalam transformator yang berfungsi sebagai isolator sekaligus sebagai pendingin[1]. Minyak isolasi berfungsi untuk mencegah terjadinya hubung singkat yang tidak diinginkan di antara komponen-komponen transformator. Selain itu, minyak isolasi transformator juga berperan dalam menghilangkan panas yang dihasilkan ketika transformator beroperasi[2]. Oleh karenanya kualitas dari minyak isolasi ini sangat mempengaruhi kinerja dari transformator.

Minyak isolasi yang digunakan hingga saat ini yaitu minyak mineral. Minyak mineral merupakan minyak yang terbuat dari pengolahan minyak bumi yang diproses secara destilasi sehingga mendapatkan hasil ketahanan isolasi yang baik[2]. Minyak mineral memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan yaitu minyak mineral memiliki stabilitas panas yang baik serta rendah viskositas. Kelebihan lainnya yaitu minyak mineral memiliki nilai tegangan tembus yang tinggi, nilai dielektrik yang rendah serta memiliki jangka waktu yang lama dalam penggunaannya. Namun, diantara kelebihanannya minyak mineral memiliki

kekurangan yaitu tidak dapat diperbaharui dan terbuat dari bahan *non-biodegradable*[6]. Oleh sebab itu kekurangan-kekurangan dari minyak mineral harus diperhatikan karena sangat berpengaruh terhadap lingkungan dan ketersediaannya di masa yang akan datang. Untuk itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dalam mencari solusi alternatif isolasi minyak transformator yang lebih ramah lingkungan dan dapat diperbaharui. Dalam mengatasi persoalan tersebut memungkinkan penggunaan bahan isolasi yang berasal dari minyak nabati.

2.2 Minyak Nabati Sebagai Minyak Isolasi Transformator

Minyak nabati merupakan minyak yang berasal dari bagian tumbuhan seperti biji, buah atau kacang-kacangan yang diolah menjadi minyak. Minyak nabati umumnya mengandung asam lemak jenuh dan asam lemak tak jenuh[7]. Minyak nabati menjadi salah satu alternatif karena minyak nabati memiliki sifat mudah diurai sehingga berdampak baik bagi lingkungan dan merupakan bahan yang mudah diperbaharui sehingga tidak perlu dikhawatirkan persediannya di masa yang akan datang. Penelitian ini membahas tentang minyak nabati yaitu minyak sawit sebagai minyak isolasi transformator.

Saat ini minyak nabati menjadi alternatif pengganti minyak mineral sebagai minyak isolasi transformator dan sudah banyak penelitian yang membahasnya. Untuk dapat menggantikan minyak mineral, minyak nabati harus memenuhi beberapa kriteria dasar, antara lain[8]:

- *Biodegradable*
- Memenuhi sifat elektrik
- Memenuhi sifat fisik
- Persediaan melimpah, dan
- Biaya murah

Beberapa sumber minyak nabati yang sudah diteliti untuk dikembangkan sebagai minyak isolasi adalah sebagai berikut:

Minyak zaitun merupakan salah satu jenis minyak nabati yang berasal dari ekstrak buah pohon zaitun (*Olea europaea*)[9]. Pada penelitian didapatkan hasil pengujian minyak zaitun dibandingkan dengan minyak mineral (Diala B) memiliki nilai

tegangan tembus yang lebih besar yaitu sebesar 49,82 kV[10]. Akan tetapi untuk menjadi alternatif pengganti minyak transformator minyak nabati jenis ini memiliki beberapa kekurangan diantaranya yaitu memiliki biaya produksi yang tinggi dan juga ketersediaannya yang terbatas.

Jenis minyak nabati lain yaitu minyak jarak (*castor oil*) yang terdiri dari sebagian besar asam risinoleat (sekitar 85-90%) yang merupakan asam lemak tak jenuh[11]. Pada penelitian didapatkan hasil penelitian yaitu pada jarak 2,5 mm tegangan tembus minyak jarak didapatkan sebesar 35,8889 kV sedangkan tegangan tembus minyak mineral sebesar 51,1111 kV[1]. Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tegangan tembus dielektrik minyak jarak belum sesuai dengan standar sebagai isolasi cair pada transformator.

Jenis minyak nabati lainnya yaitu minyak kemiri yang diekstrak dari biji buah kemiri (*Aleurites moluccanus*). Pada penelitian didapatkan hasil pengujian nilai tegangan tembus sebesar 17,55 kV pada jarak sela 2,5 mm dan masih dibawah standar SPLN 49-1 yaitu sebesar ≥ 20 kV/2,5 mm sebagai standar alternatif isolasi cair[12]. Sehingga dapat disimpulkan bahwa berdasarkan nilai hasil pengujian tegangan tembus minyak kemiri yang telah dilakukan mendapatkan hasil yang masih dibawah standar.

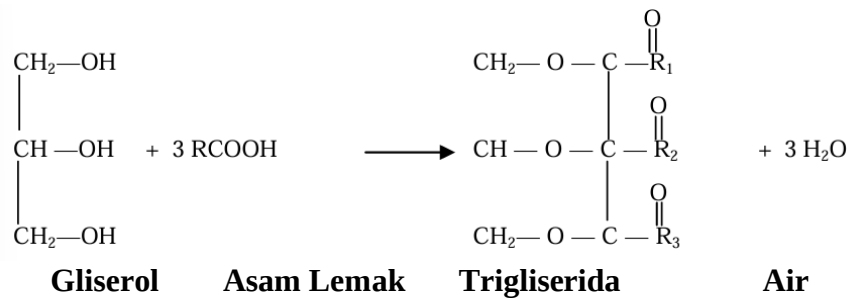
Selanjutnya jenis minyak nabati yaitu minyak kelapa murni atau biasa disebut *virgin coconut oil* yang terbuat dari minyak yang dihasilkan dari ekstraksi daging kelapa segar yang diproses secara lanjut sehingga menghasilkan minyak kelapa yang murni. Pada penelitian didapatkan hasil pengujian nilai tegangan tembus sebesar 29,17 kV pada jarak sela 2,5 mm[8]. Berdasarkan standar IEC 156 yaitu nilai tegangan tembus yang memenuhi syarat sebesar >30 kV/2,5 mm, minyak kelapa murni belum layak sebagai isolasi cair.

Jenis minyak nabati selanjutnya yaitu minyak sawit yang diperoleh dari ekstraksi daging buah kelapa sawit (*Elaeis guineensis*). Kemudian buah sawit diekstraksi untuk mengelurkan minyak sawit mentah atau CPO (*Curl palm oil*)[13]. Kelebihan

yang dimiliki minyak sawit yaitu ketersediannya yang melimpah karena Indonesia merupakan penghasil sawit terbesar di dunia. Produksi kelapa sawit Indonesia tahun 2023 dalam wujud minyak sawit (angka sementara) menunjukkan 46,99 juta ton, meningkat sebesar 0,36% dibandingkan dengan tahun sebelumnya[14]. Minyak sawit memiliki sifat *biogradable*, dan ramah lingkungan karena dapat terurai secara alami. Diantara minyak nabati jenis lainnya minyak sawit memiliki biaya produksi yang lebih rendah karena diproduksi secara besar sehingga biaya bahan bakunya lebih rendah. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Nilai tegangan tembus yang dihasilkan dari penelitian yaitu sebesar 22,9 kV, 22,5 kV dan 24,2 kV[4]. Berdasarkan SPLN 49-91-1982 dan IEC 60156-95 yang menyebutkan bahwa syarat tegangan tembus pada minyak isolator transformator adalah $\geq 30 \text{ kV}/2,5 \text{ mm}$, untuk itu minyak kelapa sawit belum memenuhi standar untuk menjadi minyak isolasi pada transformator. Nilai komoditas kelapa sawit yang tinggi di Indonesia membuka peluang dalam mengembangkannya menjadi alternatif isolasi cair transformator[14]. Pengolahan minyak kelapa sawit sebagai bahan dasar minyak isolasi diharapkan mampu memenuhi standar minyak isolasi transformator sesuai dengan SPLN 49-91 tahun 1982 sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada minyak mineral sebagai bahan isolasi utama minyak transformator.

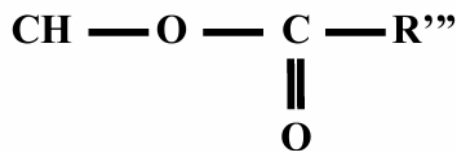
Penggunaan minyak nabati sebagai minyak isolasi menunjukkan hasil pada beberapa jenisnya belum memenuhi standar untuk menjadi digunakan sebagai minyak isolasi transformator. Minyak nabati umumnya berbentuk *trigliserida* atau *triest*, yang merupakan senyawa *gliserol* dan asam lemak jenuh dan asam lemak tak jenuh[6]. Jenis asam lemak inilah yang menentukan sifat fisik dan kimia dari minyak tersebut. Minyak dengan kadar asam lemak tak jenuhnya tinggi cenderung rentan terhadap oksidasi dan nilai viskositas. Minyak nabati perlu memiliki nilai viskositas yang rendah untuk memenuhi standar sebagai minyak isolasi. Selain itu, minyak nabati juga perlu rentan terhadap oksidasi karena melihat kerja transformator yang bekerja dalam jangka waktu yang lama. Diperlukan minyak dengan karakteristik yang memiliki nilai viskositas yang rendah dan stabilitas oksidasi yang tinggi. *Trigliserida* terbentuk dari ester dari gliserol dengan tiga molekul asam lemak[15]. Bentuk reaksinya seperti gambar dibawah. Dalam

struktur dasar *trigliserida*, rantai-rantai asam lemak minyak sawit relatif sulit dikontrol. Struktur dasar *trigliserida* dapat dilihat pada Gambar 2.1. Untuk memudahkan dalam mengontrolnya maka struktur *trigliserida* perlu diubah menjadi metil ester[16].



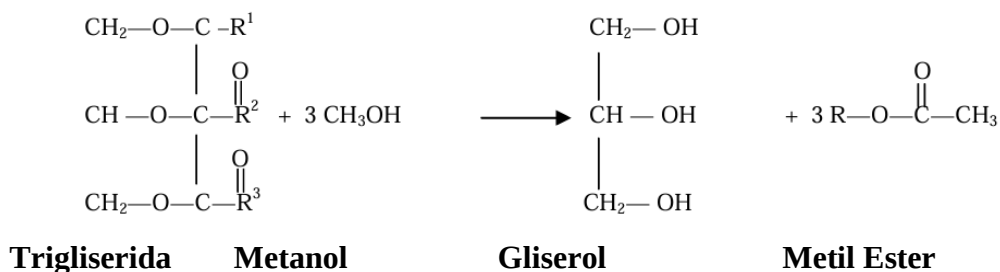
Gambar 2. 1 Struktur Dasar Trigliserida Minyak Nabati (ester alami)[16]

Metil ester merupakan ester asam lemak yang diperoleh melalui reaksi esterifikasi-transesterifikasi *trigliserida* dengan *methanol*[15]. Metil ester memiliki rantai kimia seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Rantai Kimia Metil Ester[16]

2.3 Reaksi Esterifikasi dan Transesterifikasi



Gambar 2. 3 Reaksi Esterifikasi[15]

Reaksi esterifikasi biasa digunakan pada proses pembuatan minyak isolasi berbahan dasar minyak nabati. Reaksi esterifikasi merupakan sebuah tahap awal yang

dilakukan untuk mengurangi kandungan asam lemak bebas dalam minyak. Reaksi esterifikasi seperti pada Gambar 2.3 dilakukan dengan mereaksikan minyak sawit dengan methanol dan katalis asam. Meskipun laju reaksi esterifikasi yang dikatalisis oleh asam tergolong lambat, metode ini lebih efektif untuk minyak atau lemak yang mengandung asam lemak bebas dalam jumlah yang tinggi[15]. Pada penelitian didapatkan hasil esterifikasi bahwa semakin banyak asam sulfat sebagai katalis, maka kandungan asam lemak bebas semakin berkurang[15].

Reaksi transesterifikasi merupakan reaksi antara methanol dengan trigliserida yang menghasilkan methyl ester dan gliserol dengan bantuan katalis basa. Katalis yang umum digunakan pada transesterifikasi yaitu katalis basa homogen. Contoh katalis basa homogen yaitu NaOH (*Natrium hidroksida*) dan KOH (*kalium hidroksida*)[17]. Penggunaan katalis basa dalam jumlah banyak dapat menetralkan asam lemak bebas di dalam trigliserida. Sehingga semakin banyak jumlahnya, maka metil ester yang terbentuk akan semakin banyak pula[15]. Pada penelitian melakukan pembuatan minyak metil ester biji karet dengan perbandingan 1:8 antara minyak biji karet dan methanol. Didapatkan hasil pengujian nilai tegangan tembus minyak metil ester biji karet didapatkan nilai sebesar 48,013 kV/2,5 mm dan sesuai dengan standar isolasi minyak transformator[17]. Berdasarkan SNI 04-7182-2006 keberhasilan produk metil ester ditandai dengan besarnya kadar ester yaitu sebesar 96,5%, syarat mutu kadar air metil ester yaitu maksimal 0,05% dan bilangan asam metil ester maksimal 0,8 mgKOH/g[18].

Minyak nabati sangat berpeluang menjadi alternatif pengganti minyak isolasi transformator. Namun, minyak sawit cenderung memiliki nilai viskositas yang tinggi untuk menjadi minyak isolasi transformator. Standar nilai viskositas minyak isolasi transformator menurut SPLN 49-91-1982 yaitu sebesar ≤ 40 cSt. Untuk itu diperlukan solusi dalam mengurangi nilai viskositas minyak sawit agar memenuhi syarat sebagai isolasi minyak transformator. Salah satu solusi yang dilakukan yaitu dengan mengubahnya menjadi struktur metil ester. Selain itu, masalah lain dari minyak nabati untuk menjadi minyak isolasi transformator yaitu cenderung mengalami oksidasi lebih cepat terutama saat terpapar suhu yang tinggi[19].

Penambahan zat aditif kedalam metil ester minyak nabati menjadi solusi dalam memperbaiki stabilitas oksidasi dari metil ester minyak nabati.

2.4 Zat Aditif

Zat aditif merupakan bahan kimia yang apabila ditambahkan kedalam suatu produk seperti minyak, makanan, bahan bakar atau lainnya akan memperbaiki, mengubah, atau dan menambahkan sifat-sifat tertentu. Penambahan antioksidan pada minyak nabati dapat meningkatkan stabilitas termal dalam mencegah degradasi minyak pada suhu tinggi, menambah stabilitas oksidatif untuk mencegah minyak dari reaksi oksidasi yang dapat merusak sifat isolasi minyak, meningkatkan kemampuan minyak dalam mencegah tegangan tembus, dsb[20]. Zat aditif dibagi dalam beberapa jenis yaitu diantaranya:

Ascorbic Acid (asam askorbat) atau dikenal dengan Vitamin C merupakan senyawa antioksidan alami yang memiliki rumus kimia $C_6H_8O_6$ dengan bentuk kristal putih larut air dan bersifat asam lemah. *Ascorbic Acid* memiliki kemampuan untuk menangkap radikal bebas yang dapat menghambat proses oksidasi, sehingga cocok digunakan untuk menjaga kestabilan oksidasi minyak nabati. Pada penelitian menunjukkan dengan penambahan antioksidan dapat memperpanjang masa pakai minyak dibawah kondisi suhu yang tinggi[19].

TBHQ adalah senyawa fenolik sintesis yang memiliki rumus kimia $C_{10}H_{14}O_2$ yang memiliki ciri-ciri berwarna putih kristal abu-abu, teksturnya sangat ringan dan memiliki bau khusus[21]. TBHQ atau dikenal dengan *tert-butylhydroquinone* merupakan bahan kimia yang memiliki fungsi sebagai antioksidan. TBHQ berfungsi mencegah oksidasi dalam minyak sehingga dapat memperpanjang masa simpan minyak. Pada penelitian menunjukkan bahwa antioksidan yang paling efektif menghambat oksidasi adalah TBHQ (pada konsentrasi 0,07-0,10%[5].

BHT (*Butylated Hydroxytoluene*) atau dikenal juga sebagai *dibutyl hydroxytoluene* merupakan zat aditif yang memiliki rumus kimia $C_{15}H_{24}O$. BHT memiliki sifat fisika antara lain nilai titik lebur sebesar 70°C, titik didih sebesar 182°C, berat

molekul sebesar 220,35 gr/mol, dengan kepadatan 1,05 gr/cm³[22]. Pada penelitian didapatkan hasil bahwa nilai tegangan tembus dari CPO dengan penambahan zat aditif BHT (*Butylated Hydroxytoluene*) sesuai komposisi yang digunakan belum memenuhi standar nilai tegangan tembus isolasi transformator[23].

Butylated Hydroxyanisole merupakan jenis zat aditif yang memiliki sifat padatan kristal atau lilin berwarna putih sedikit kuning dengan bau yang samar. *Butylated Hydroxyanisole* larut dalam alkohol, lemak, minyak, dll serta mencair pada suhu 46-63°C. *Butylated Hydroxyanisole* memiliki komposisi campuran dari dua senyawa isomeric, 2-*tert*-butil-4-hidroksi dan 3-*tert*-butil-4-hindoksianisol. Senyawa ini dibuat dari 4 metoksifenol dan isobutilena. *Butylated Hydroxyanisole* memiliki rumus kimia C₁₁H₁₆O₂, massa molar sebesar 180,247 gr/mol, kepadatan sebesar 1,0587 gr/cm³ pada suhu 20°C, titik lebur sebesar 48-55°C dan titik didih sebesar 264-270°C. Bahan aditif ini biasa digunakan sebagai bahan pengawet dalam makanan, pakan ternak, kosmetik, dll[20]. Pada penelitian didapatkan hasil yaitu disimpulkan bahwa antioksidan *butylated Hydroxyanisole* (BHA) dapat meningkatkan nilai tegangan tembus pada minyak kedelai. Hal ini dikarenakan sifat dari BHA yang mempunyai sifat antioksidan yang tinggi[24].

Penambahan zat aditif pada minyak nabati bertujuan untuk memperbaiki nilai stabilitas oksidasi, viskositas dan tegangan tembus yang belum memenuhi standar untuk menjadi minyak isolasi transformator. Berdasarkan penelitian didapatkan hasil dengan penambahan zat aditif TBHQ sangat efektif untuk mempertahankan stabilitas oksidasi metil ester minyak sawit[16].

2.5 Viskositas

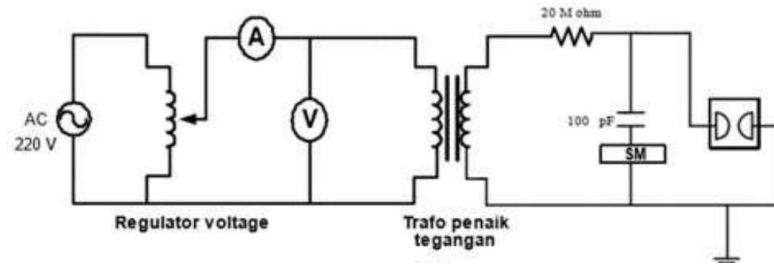
Viskositas atau biasa disebut kekentalan adalah tingkat ketahanan suatu fluida terhadap tegangan yang diterimanya. Viskositas disebabkan oleh adanya gaya kohesi antar partikel fluida[25]. Nilai viskositas menjadi salah satu parameter dalam menentukan kualitas suatu minyak isolasi yang baik. Nilai viskositas mempengaruhi kualitas isolasi, kemampuan pendinginan dan ketahanan *flashover* serta kebocoran tegangan[23]. Hal ini dapat dilihat apabila viskositas tinggi maka

minyak akan lebih kental sehingga alirannya lambat dan dapat menyebabkan kenaikan suhu serta mempercepat degradasi isolasi. Sebaliknya, apabila nilai viskositas rendah maka minyak akan lebih encer dan alirannya lebih baik sehingga lebih efektif dalam menghilangkan panas didalam transformator dan juga membantu menjaga suhu dalam batas aman untuk menjaga umur isolasi. Standar nilai viskositas diatur dalam SPLN 49-91 : 1982 dimana nilai viskositas yang baik dari sebuah minyak isolasi adalah ≤ 40 cSt pada suhu 20°C. Permasalahan yang terjadi yaitu minyak nabati murni cenderung memiliki nilai viskositas yang tinggi dan tidak memenuhi standar. Berdasarkan penelitian diketahui bahwa pada minggu ketiga dan keempat antioksidan yang paling efektif menurunkan viskositas adalah TBHQ[5].

2.6 Tegangan Tembus

Tegangan tembus (*breakdown voltage*) merupakan tegangan minimum yang menyebabkan material isolator (dielektrik) kehilangan sifat isolasinya dan menjadi konduktor listrik. Hal ini terjadi ketika tegangan yang diterapkan pada dielektrik melebihi batas kekuatan isolasi material tersebut, sehingga arus listrik dapat mengalir melaluinya[8]. Pada minyak isolasi pengujian tegangan tembus menggunakan bahan isolasi udara menggunakan bantuan alat uji elektroda bola. Tegangan tembus merupakan nilai tegangan yang diperlukan untuk dapat menembus lapisan minyak isolasi di antara 2 buah elektroda yang diberi jarak 1 sampai 2,5 mm. Jarak antara elektroda juga berpengaruh terhadap nilai tegangan tembus yaitu semakin besar jarak elektroda maka tegangan tembus juga akan semakin besar, hal ini dikarenakan energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron juga semakin besar[17].

Menurut standar SPLN 49-1 tegangan tembus yang harus dipenuhi untuk minyak isolasi baru adalah ≥ 30 kV/2,5 mm[12]. Rangkaian tegangan tembus dapat dilihat seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Rangkaian Pengujian Tegangan Tembus Minyak Transformator [26]

Minyak nabati menjadi salah satu alternatif pengganti minyak isolasi transformator yang ramah lingkungan dan ketersediannya tidak menjadi masalah. Namun untuk menjadi minyak isolasi transformator harus memenuhi standar yang ada sebagai minyak isolasi, dan minyak nabati murni belum memenuhi standar sebagai minyak isolasi yaitu untuk nilai viskositas dan nilai tegangan tembusnya. Untuk itu pada penelitian ini dilakukan perbaikan nilai viskositas dan tegangan tembus dengan mengubah minyak nabati menjadi struktur metil ester dan menambahkan zat aditif untuk memperbaiki nilai viskositas dan tegangan tembusnya. Dalam proses mengubah minyak nabati menjadi metil ester dilakukan proses esterifikasi untuk mendapatkan metil ester. Lalu untuk zat aditif yang digunakan dalam penelitian yaitu zat aditif *Ascorbic Acid* (AA) dan *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari – Mei 2025. Adapun tempat pelaksanaan penelitian yaitu di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, Laboratorium Teknik Kimia Universitas Lampung untuk proses kimiawi dan PT. PLN (Persero) ULTG Tegineneng untuk pengujian nilai tegangan tembus.

Adapun jadwal penelitian adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 1Jadwal Penelitian

No	Jenis Kegiatan	Bulan ke-							
		11	12	1	2	3	4	5	6
1	Pencarian literatur								
2	Penulisan Laporan								
3	Seminar Proposal								
4	Pembuatan dan Pengujian metil ester minyak sawit								
5	Analisis Data dan Penulisan laporan penelitian								
6	Seminar Hasil								
7	Komprehensif								

3.2 Bahan dan Alat

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

1. Minyak sawit mentah (CPO)
2. *Ascorbic Acid* (AA)
3. *Tertiary Butylhydroquinone* (TBHQ)
4. KOH

5. Methanol
6. Air akuades
7. H_2SO_4
8. Asam Oksalat
9. Ethanol
10. Indicator PP
11. Gelas beaker
12. Corong
13. Sendok aduk
14. Pipet ukur
15. *Hoteplate*
16. *Push ball*
17. Panci listrik
18. Desikator
19. Oven
20. Lemari asam
21. Timbangan digital
22. *Magnetic stirrer*
23. Piknometer
24. Cawan
25. *Thermometer*
26. Kertas lakmus

3.3 Metode Penelitian

Adapun metode penelitian adalah sebagai berikut:

3.3.1 Pembuatan Metil Ester Minyak Sawit

Adapun tahapan pembuatan metil ester minyak sawit terbagi menjadi 2 proses antara lain sebagai berikut:

A. Proses Esterifikasi

1. Memanaskan sampel CPO sebanyak 500 ml menggunakan *hoteplate* hingga mencapai suhu 60°C.
2. Mencampurkan 130 ml methanol dengan 5 ml H_2SO_4 lalu diaduk hingga merata.
3. Memasukkan campuran Methanol dan H_2SO_4 kedalam minyak CPO dengan rentang suhu 60°C-70°C dan diaduk dengan kecepatan 800 rpm menggunakan *magnetic stirred* selama 1 jam.
4. Memasukan campuran minyak CPO dengan methanol dan H_2SO_4 kedalam corong pisah lalu melakukan proses pencucian. Pencucian dilakukan dengan memasukkan 200 ml akuades hangat (suhu $\pm 60-70^\circ\text{C}$) kedalam campuran minyak lalu dicuci sebanyak 3-5 kali sampai pH netral yang dibuktikan dengan kertas lakmus.
5. Mengoven minyak hasil esterifikasi menggunakan oven hingga 6 jam, lalu didiamkan di desikator.

B. Proses Transesterifikasi

1. Memanaskan minyak hasil esterifikasi hingga suhu mencapai 60°C.
2. Memasukkan 343 ml methanol dan 4,5 gr KOH kedalam minyak hasil esterifikasi dengan rentang suhu 60°C dan diaduk dengan kecepatan 1000 rpm menggunakan *magnetic stirred* selama 1 jam
3. Memasukkan campuran minyak dengan methanol dan KOH kedalam corong pisah dan melakukan pencucian dengan ± 200 ml akuades hangat (suhu $\pm 60-70^\circ\text{C}$) sebanyak 3-4 kali sampai pH netral yang dibuktikan dengan kertas lakmus.
4. Mengoven metil ester kedalam oven hingga 6 jam, lalu didiamkan didalam desikator.
5. Setelah metil ester dingin lalu dimasukkan kedalam botol dan disimpan disuhu ruangan.

3.3.2 Pengujian Kualitas Metil ester minyak sawit

Adapun uji kualitas metil ester yang dapat diuji antara lain adalah sebagai berikut[27]:

Tabel 3. 2 Parameter Uji Kualitas Metil ester

No	Parameter Uji	Satuan	SNI
1	Massa Jenis	Kg/m^3	860-890
2	Angka Asam	MgKOH/g	Maks. 0,5
2	Viskositas Kinematik	mm^2/s (cSt)	2,3 – 6,0P

A. Massa Jenis

Pengujian masa jenis atau densitas dilakukan dengan menggunakan metode *specific gravity* yaitu dengan melakukan pengukuran densitas metil ester minyak sawit 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 minyak sawit dan menimbanginya menggunakan timbangan digital untuk mengetahui massa metil ester minyak sawit. Densitas metil ester minyak sawit dihitung dengan Persamaan 3.1 dibawah ini:

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

Setelah mengetahui densitas metil ester minyak sawit, tahapan selanjutnya yaitu menghitung densitas air dengan cara yang sama sebagai densitas reference. Untuk menghitung specific gravity dihitung dengan Persamaan 3.2 berikut:

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

B. Bilangan Asam

Pengujian angka asam dilakukan dengan metode titrasi menggunakan 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.

Langkah pertama untuk memulai pengujian yaitu menyiapkan sampel metil ester minyak sawit sebanyak 2 gram 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 3.3 berikut:

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

C. Viskositas Kinematik

Pengujian viskositas kinematik dilakukan dengan menggunakan alat uji viskositas yaitu *viscometer otswald*. Pengujian dilakukan dengan memasukkan ± 10 ml metil ester minyak sawit 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 3.4 berikut:

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

3.3.3 Penambahan Zat Aditif

Adapun tahap penambahan zat aditif adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penimbangan zat aditif menggunakan timbangan digital dengan persentase komposisi gram AA dan TBHQ yang ditambahkan sebesar 2,5 gram dan 5 gram untuk masing-masing zat aditif.
2. Memanaskan sampel metil ester minyak sawit sebanyak 500 ml hingga mencapai suhu 70°C .
3. Mencampurkan zat aditif dengan sampel metil ester minyak sawit dan diaduk secara konsisten agar dapat tercampur dengan rata menggunakan *magnetic*

stirred dengan kecepatan 800 rpm selama 60 menit. Lalu kemudian sampel disimpan suhu ruangan.

3.3.4 Pengujian Tegangan Tembus pada Metil Ester Minyak Sawit Dengan Penambahan Zat Aditif

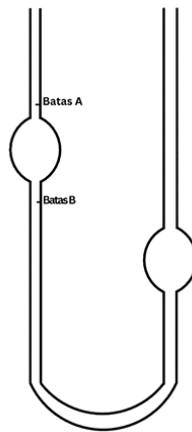
Pengujian tegangan tembus metil ester minyak sawit dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan minyak dalam menahan isolasi. Pengujian ini juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan zat aditif pada metil ester minyak sawit yang akan diuji. Pengujian dilakukan di PT. PLN (Persero) ULTG Tegineneng. Pengujian tegangan tembus dilakukan dengan menggunakan alat yaitu Megger OTS80AF Oil Tester. Pengujian dilakukan dengan menggunakan jenis elektroda setegah bola dengan diameter 12,5 mm dan jarak antara elektroda sebesar 2,5 mm.

Adapun tahapan pengujian tegangan tembus adalah sebagai berikut:

1. Membersihkan wadah uji menggunakan alkohol dan sampel minyak.
2. Memasukkan sampel metil ester minyak sawit sebanyak 400 ml ke dalam wadah uji.
3. Menghidupkan alat uji tegangan tembus.
4. Memulai pengujian dengan menekan tombol *start* pada alat uji.
5. Melihat hasil pengujian yang tercetak pada alat uji secara otomatis.
6. Menghitung dan mengambil rata-rata setiap sampel pengujian.

3.3.5 Pengujian Viskositas pada Metil Ester Minyak Sawit Dengan Penambahan Zat Aditif

Pengujian viskositas dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Universitas Lampung. Pengujian viskositas dilakukan untuk mengetahui kekentalan dari sampel minyak yang akan diuji. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui efek dari penambahan zat aditif pada metil ester minyak sawit yang akan diuji. Standar viskositas minyak isolasi transformator berdasarkan SPLN 49-91 : 1982 yaitu sebesar 40 cst pada suhu 20°C dan ≤ 12 cSt pada suhu 40°C.



Gambar 3. 1 Viscometer Ostwald

Adapun tahapan pengujian adalah sebagai berikut[22]:

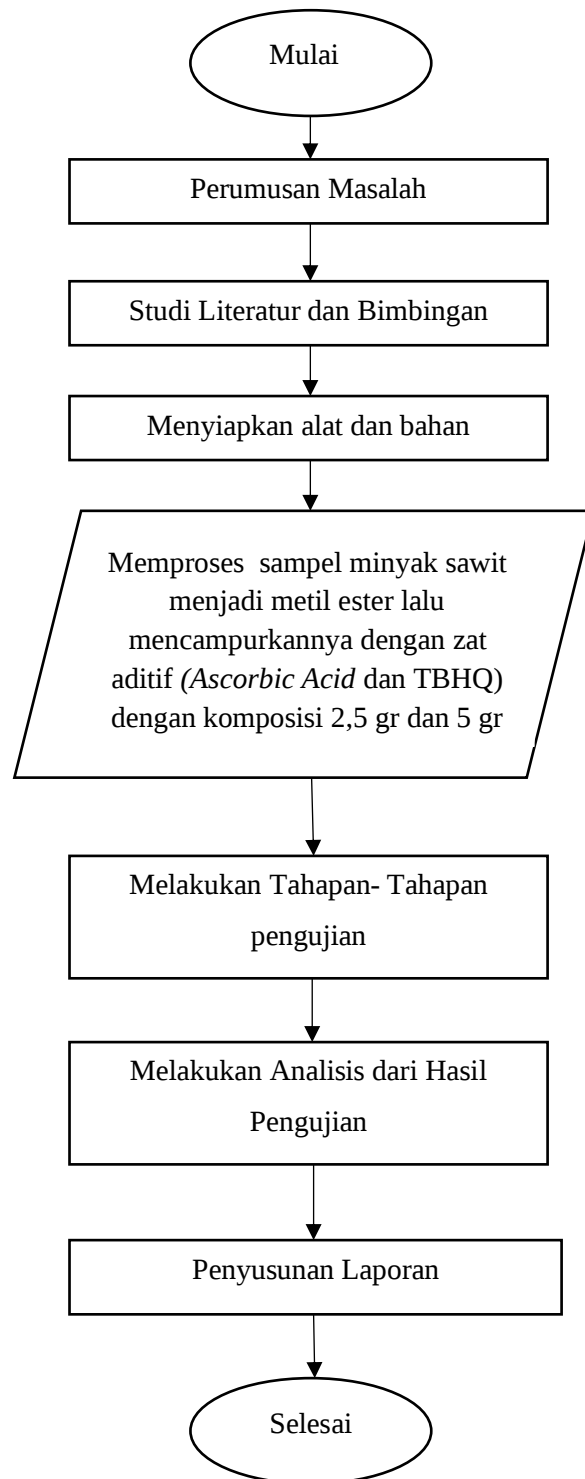
1. Memasukkan sampel minyak sebanyak 10 ml yang sudah dipanaskan hingga mencapai suhu 40°C kedalam viskometer secara perlahan.
2. Memasang *pushball* atau bola penghisap pada lubang *viscometer Ostwald* dan hisap minyak hingga mencapai batas a.
3. Melepaskan *pushball* sehingga minyak akan mulai turun hingga mencapai batas b.
4. Mengukur waktu yang diperlukan minyak untuk turun dari batas a ke batas b dengan menggunakan *stopwatch* lalu catat waktu yang didapatkan.
5. Mengulangi langkah-langkah diatas hingga 3 kali lalu mengambil rata-rata dari pengujian viskometer. Hasil dari rata-rata kemudian akan digunakan untuk menghitung nilai viskositas dari sampel metil ester minyak sawit.

3.3.6 Analisis Data Hasil Pengujian Metil Ester Minyak Sawit

Pengolahan data akan dilakukan penulis dari hasil pengujian minyak isolasi yang telah dilakukan. Diantaranya pengujian yang dilakukan yaitu terdapat uji kualitas metil ester minyak sawit (massa jenis, bilangan asam, dan viskositas kinematik), lalu pengujian pada metil ester dengan penambahan zat aditif yaitu uji sifat listrik (uji tegangan tembus) dan uji sifat fisik (uji viskositas). Hasil pengujian yang diperoleh akan diambil rata-rata dan dianalisis apakah metil ester minyak sawit memiliki kelayakan yang sesuai sebagai metil ester minyak sawit dan standar sebagai minyak isolasi transformator.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian adalah sebagai berikut:



V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil uji kualitas metil ester minyak sawit didapatkan parameter yang memenuhi sebagai syarat SNI metil ester minyak sawit yaitu pada pengujian massa jenis dan viskositas. Sedangkan pada nilai bilangan asam belum memenuhi standar SNI metil ester minyak sawit karena nilai yang didapatkan melebihi batas maksimal nilai bilangan asam.
2. Nilai pengujian viskositas dari metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif pada AA secara berturut sebesar 5.28 cSt dan 5.18 cSt, sedangkan pada TBHQ secara berturut sebesar 5.66 cSt dan 5.67 cSt sudah memenuhi standar SPLN 49-91 :1982 dimana nilai viskositas pada minyak isolasi transformator yaitu sebesar <12 cSt pada suhu 40°C.
3. Berdasarkan hasil pengujian tegangan tembus yang dilakukan pada metil ester minyak sawit dengan penambahan zat aditif pada AA secara berturut sebesar 17 Kv dan 18.4 kV, sedangkan pada TBHQ secara berturut sebesar 18,2 kV dan 24,5 kV data hasil yang didapatkan menunjukkan hasil yang belum memenuhi standar nilai tegangan tembus minyak isolasi transformator pada SPLN 49-91 :1982 yaitu sebesar ≥ 30 kV.

5.2 SARAN

Adapun saran untuk penelitian adalah sebagai berikut:

1. Melakukan uji FFA terlebih dahulu pada minyak sawit mentah sebelum masuk ke proses pembuatan metil ester yaitu proses esterifikasi dan transesterifikasi.
2. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan menggunakan sampel minyak dengan penambahan zat aditif yang lebih banyak untuk lebih dapat melihat pengaruh penambahan zat aditif yang digunakan.
3. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian terhadap parameter-parameter lainnya yang tidak dilakukan pada penelitian ini.
4. Pada penelitian selanjutnya sampel CPO yang akan digunakan sebaiknya tidak disimpan di ruangan yang memiliki suhu yang berubah-ubah untuk menghindari naiknya angka asam yang terkandung dalam CPO.
5. Pada penelitian selanjutnya dapat digunakan jenis katalis lain untuk proses esterifikasi dan transesterifikasi yang berbeda dengan penelitian ini.
6. Memperhatikan dengan detail informasi terkait bahan kimia yang digunakan untuk penelitian dan dapat melakukan uji fisik terlebih dahulu sebelum digunakan.
7. Memperhatikan pengaruh oksidasi saat pengujian tegangan tembus dan dapat melakukan perlakuan khusus terlebih dahulu sebelum memulai pengujian, seperti pemanasan sampel terlebih dahulu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Mustiko Aji, “Pengujian Tembus Dielektrik Minyak Jarak Sebagai Alternatif Pengganti Isolasi Pada Minyak Trafo,” *J. Ecotipe*, vol. 4, no. 1, 2017.
- [2] J. Ilham and S. Salim, “Studi Karakteristik Minyak Nilam Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Transformator,” *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, 2019.
- [3] H. A. Hasibuan, “Kajian Mutu dan Karakteristik Minyak Sawit Indonesia serta Produk Fraksinasinya,” *Agustus*, vol. 14, no. 1, pp. 13–21, 2011.
- [4] A. F. Sidiq, “Kekuatan Tegangan Breakdown Minyak Kelapa Sawit(Palm Oil) Dengan Isolasi Kertas Kraft (Craft Paper) Sebagai Isolasi Pada Transformator,” UNILA, 2023.
- [5] H. Roliadi, R. Sudradjat, and A. Anggraini, “Kemungkinan Penggunaan Antioksidan Guna Mempertinggi Ketahanan Oksidasi Biodiesel Dari Minyak Biji Tanaman Jarak Pagar,” *J. Penelit. Has. Hutan*, vol. 30, no. 1, pp. 69–86, 2012.
- [6] A. Rajab, H. Yestian, R. M. Pradipta, and T. U. Septiyeni, “Pengembangan Minyak Isolasi Transformator Ramah Lingkungan dan Terbarukan Dari Etil Ester,” *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 8, no. 1, p. 22, 2022.
- [7] A. S. Fitri and Y. A. N. Fitriana, “Analisis Angka Asam pada Minyak Goreng dan Minyak Zaitun,” *Sainteks*, vol. 16, no. 2, pp. 115–119, 2020, doi: 10.30595/st.v16i2.7128.

- [8] E. Budiyanoro, A. Syakur, and M. Facta, “Analisis Tegangan Tembus Minyak Kelapa Murni (Virgin Coconut Oil) Sebagai Isolasi Cair Dengan Variasi Elektroda Uji.”
- [9] R. F. Syamsu, Tebi, Y. Yustika Saifullah, and Febriyanti, “Efektivitas Minyak Zaitun Terhadap Bakteri Gram Positif Dan Bakteri Gram Negatif,” *Prepotif J. Kesehat. Masy.*, vol. 7, no. 3, pp. 16957–16971, 2023.
- [10] B. Sujatmiko, “Karakteristik Fisik dan Elektris Minyak Zaitun sebagai Alternatif Minyak Isolasi pada Transformator,” Universitas Brawijaya, 2016. [Online]. Available: <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/144362/>
- [11] A. Ansori, N. Purwasih, H. H. Sinaga, and D. Permata, “Analisis Tegangan Tembus Pada Minyak Jarak (Castor Oil) Sebagai Alternatif Isolator Minyak Transformator,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 10, no. 2, 2022, [Online]. Available: <http://journal.eng.unila.ac.id/index.php/jitet/article/view/2440>
- [12] 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.
- [13] A. Rajab, “Prospek Minyak Rbd Olein Kelapa Sawit Sebagai Minyak Isolasi Transformator Alternatif,” *Teknika*, vol. 1, no. 29, pp. 34–37, 2008.
- [14] R. Intan Rahayu, Saefudin, Sri wahyuningsih, Sehusman, *Analisis Kinerja Perdagangan Komoditas Kelapa Pusat Data Dan Sistem Informasi Pertanian Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian 2022*. 2022.
- [15] S. Arita, M. B. Dara, and J. Irawan, “Pembuatan Metil Ester Asam Lemak Dari Cpo Off Grade Dengan Metode Esterifikasi-Transesterifikasi,” 2008.
- [16] A. Rajab, A. Pawawoi, A. Sulaeman, and D. Mujahidin, “Studi Penggunaan Metil Ester Minyak Sawit Sebagai Minyak Isolasi Peralatan Listrik,” 2014.
- [17] M. Alifiah, “Pembuatan Dan Pengujian Minyak Metil Ester Biji Karet Sebagai Isolasi Transformator Tegangan Tinggi,” no. July, pp. 1–23, 2016.

- [18] N. A. Deli, “Sintesis Metil Ester Sulfonat dari Sulfonasi Metil Ester Minyak Sawit dengan Agen $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$,” *J. Educ.*, vol. 5, no. 3, pp. 9066–9076, 2023, doi: 10.31004/joe.v5i3.1706.
- [19] A. Sarin, R. Arora, N. P. Singh, R. Sarin, and R. K. Malhotra, “Oxidation stability of palm methyl ester: Effect of metal contaminants and antioxidants,” *Energy and Fuels*, vol. 24, no. 4, pp. 2652–2656, 2010.
- [20] N. Fitri, “Butylated hydroxyanisole sebagai Bahan Aditif Antioksidan pada Makanan dilihat dari Perspektif Kesehatan,” 2013.
- [21] H. Widodo, L. Adhani, S. Solihatun, M. Prastya, and A. Annisa, “Pemanfaatan Minyak Cengkeh Sebagai Antioksidan Alami Untuk Menurunkan Bilangan Peroksida Pada Produk Minyak Goreng,” *J. Penelit. Dan Karya Ilm. Lemb. Penelit. Univ. Trisakti*, vol. 5, no. 1, pp. 77–90, 2020.
- [22] I. N. Anggraini, A. J. Fitri, Y. S. Handayani, Y. Rodiah, A. Herawati, and R. S. Rinaldi, “Analisis Karakteristik Minyak Biji Karet Dengan Penambahan Zat Aditif Sebagai Alternatif Isolasi Cair,” *J. Amplif. J. Ilm. Bid. Tek. ELEKTRO DAN Komput.*, vol. 14, no. 2, pp. 184–190, Nov. 2024.
- [23] R. A. Sitorus, “Uji Tegangan Tembus dan Viskositas Minyak Sawit dengan Penambahan Butylated Hydroxytoluene (BHT) Sebagai Alternatif Isolasi Minyak Transformator,” UNILA, 2024.
- [24] Y. S. Handayani, Rika Elvan, Irnanda Priyadi, and Adhadi Kurniawan, “Analisis Karakteristik Minyak Kedelai Dengan Penambahan Antioksidan Sebagai Alternatif Minyak Isolasi Transformator Terhadap Tegangan Tembus,” *J. Amplif. J. Ilm. Bid. Tek. Elektro Dan Komput.*, vol. 13, no. 2, pp. 69–77, 2023.
- [25] N. F. R. Meylan Kharisma Putri, Rahmatul Ula Asshaumi, “Analisis Nilai Kecepatan Terhadap Viskositas pada Fluida,” *J. Phys. A Math. Theor.*, vol. 8, no. 1, pp. 89–96, 2024.
- [26] S. Rahayu, R. Okvasari, and R. A. Diantari, “Pengujian Analisis

TeganganTembus Minyak Transformator 60 MVA Di GIS Kebun Jeruk,”
Sutet, vol. 9, no. 1, pp. 46–55, 2019.

- [27] I. Y. Priyambudi and M. R. F. Amrullah, “Aplikasi Katalis Heterogen Fe₂O₃/CaO Pada Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Kelapa Sawit,” 2017, [Online]. Available: <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/2559/>
- [28] T. Prakoso, I. Kurniawan, and H. Nugroho, “Esterifikasi Asam Lemak Bebas Dalam Minyak Sawit Mentah Untuk Produksi Metil Ester,” 2007.
- [29] D. I. Nengsih, Syarfi, and J. Asmura, “Pengaruh Rasio Molar Umpan Terhadap Metanol dan Waktu Reaksi Proses Pembuatan Biodiesel Menggunakan Membran Reaktor,” *J. Online Mhs. Fak. Tek. Univ. Riau*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2014.
- [30] S. S. Kumar, M. W. Iruthayarajan, M. Bakruthen, and S. G. Kannan, “Effect of antioxidants on critical properties of natural esters for liquid insulations,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 4, pp. 2068–2078, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.7556480.