



**EVALUASI EKSPERIMENTAL PEMBENTUKAN GAS
TERLARUT AKIBAT *THERMAL AGING* PADA MINYAK
ISOLASI TRANSFORMATOR BERBASIS MINYAK BIJI
KARET**

SKRIPSI

AHMAD RAFLI HIMAWAN

2210314085

**UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
2026**



**EVALUASI EKSPERIMENTAL PEMBENTUKAN GAS
TERLARUT AKIBAT *THERMAL AGING* PADA MINYAK
ISOLASI TRANSFORMATOR BERBASIS MINYAK BIJI
KARET**

SKRIPSI

**Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik**

AHMAD RAFLI HIMAWAN

2210314085

**UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
2026**

HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI

Skripsi yang diajukan oleh:

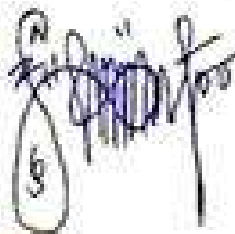
Nama : Ahmad Rafli Himsawan
NIM : 2210314085
Program Studi : S1 – Teknik Elektro
Judul Skripsi : EVALUASI EKSPERIMENTAL PEMBENTUKAN GAS TERLARUT AKIBAT *THERMAL AGING* PADA MINYAK ISOLASI TRANSFORMATOR BERBASIS MINYAK Biji KARET

telah berhasil dipertahankan di hadapan tim penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.



Dr. Luh Krisnawati, S.T., M.T.

Penguji Utama



Dr. Ir. Ferdianto, S.T., M.T.

Penguji Lembaga



Dr. Eng. Ir. Teguh Firmansyah,
S.T., M.T., I.P.M.

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Henry Binsar Hamenangan
Situmorang, S.T., M.T.

Penguji I (Pembimbing)



Dr. Luh Krisnawati, S.T., M.T.

Koordinator Program Studi
Teknik Elektro

Ditetapkan di: Jakarta

Tanggal Ujian: 23 Juli 2026

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING SKRIPSI

**EVALUASI EKSPERIMENTAL PEMBENTUKAN GAS
TERLARUT AKIBAT *THERMAL AGING* PADA MINYAK
ISOLASI TRANSFORMATOR BERBASIS MINYAK BIJI
KARET**

Ahmad Rafli Himawan

NIM. 2210314085

Disetujui oleh,

Pembimbing I



**Dr. Ir. Henry Binsar
Hamonangan Sitorus, S.T., M.T**

Pembimbing II



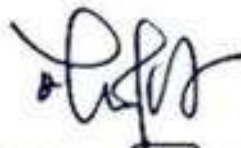
**Muhamad Alif Razi, S.Pi.,
M.Sc.**

Mengetahui,

Koordinator Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknik

Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta



Luh Krisnawati, S.T., M.T.

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini merupakan hasil karya sendiri dan semua sumber yang dikutip ataupun digunakan sebagai rujukan telah saya nyatakan benar.

Nama : Ahmad Rafli Himawan

NIM : 2210314085

Program Studi : S1 – Teknik Elektro

Apabila di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan saya ini, saya bersedia dituntut dan diproses sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Jakarta, 23 Juli 2026

Yang menyatakan,



Ahmad Rafli Himawan

HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai *civitas academica* Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Rafli Himawan

NIM : 2210314085

Program Studi : S1 – Teknik Elektro

menyetujui untuk memberikan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

EVALUASI EKSPERIMENTAL PEMBENTUKAN GAS TERLARUT AKIBAT THERMAL AGING PADA MINYAK ISOLASI TRANSFORMATOR BERBASIS MINYAK BIJI KARET

Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta berhak menyimpan, mengalih-media/formatkan, mengelola (dalam bentuk pangkalan data, merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan pemilik hak cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta, 23 Juli 2026

Yang menyatakan,



Ahmad Rafli Himawan

**EVALUASI EKSPERIMENTAL PEMBENTUKAN GAS TERLARUT
AKIBAT *THERMAL AGING* PADA MINYAK ISOLASI
TRANSFORMATOR BERBASIS MINYAK BIJI KARET**

Ahmad Rafli Himawan

ABSTRAK

Minyak isolasi transformator memiliki peran penting sebagai media isolasi listrik sekaligus pendingin untuk menjaga keandalan operasi transformator. Penggunaan minyak mineral sebagai minyak isolasi konvensional memiliki beberapa keterbatasan, antara lain berasal dari sumber daya tak terbarukan dan memiliki tingkat biodegradabilitas yang rendah. Oleh karena itu, minyak nabati, khususnya minyak biji karet (*Rubber Seed Methyl Ester Oil* atau RSMEO), berpotensi menjadi alternatif minyak isolasi yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *thermal aging* terhadap pembentukan gas terlarut pada minyak biji karet serta mengevaluasi karakteristik gas yang terbentuk menggunakan metode DGA. Sampel minyak dipanaskan pada temperatur 115°C dengan variasi waktu 48 jam dan 96 jam, kemudian dilakukan pengujian menggunakan kromatografi gas untuk mengukur konsentrasi gas H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO, dan CO₂. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses *thermal aging* menyebabkan terbentuknya gas-gas hasil degradasi dengan dominasi gas C₂H₆ (etana), sedangkan gas C₂H₂ (asetilena) tidak terdeteksi. Interpretasi data menggunakan *Key Gas Method* (KGM) mengidentifikasi kondisi *overheated oil* berdasarkan dominasi gas C₂H₆ pada kedua sampel, sedangkan metode Segitiga Duval menempatkan kedua sampel pada zona T1, yaitu *thermal fault* dengan temperatur di bawah 300°C. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode DGA mampu mengidentifikasi karakteristik pembentukan gas akibat *thermal aging* pada minyak biji karet, sehingga berpotensi digunakan sebagai salah satu metode diagnosis kondisi minyak isolasi transformator berbasis ester nabati.

Kata kunci: *minyak biji karet, RSMEO, thermal aging, DGA, minyak isolasi transformator*

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF DISSOLVED GAS FORMATION DUE
TO THERMAL AGING IN RUBBER SEED OIL-BASED TRANSFORMER
INSULATING OIL**

Ahmad Rafli Himawan

ABSTRACT

Transformer insulating oil plays an important role as both an electrical insulating medium and a cooling medium to ensure the reliable operation of power transformers. Conventional mineral insulating oil has several limitations, including its non-renewable origin and low biodegradability. Therefore, vegetable-based insulating oils, particularly Rubber Seed Methyl Ester Oil (RSMEO), have attracted considerable attention as environmentally friendly alternatives. This study aims to investigate the effect of thermal aging on dissolved gas generation in RSMEO and to evaluate the characteristics of the generated gases using the Dissolved Gas Analysis (DGA) method. The oil samples were subjected to thermal aging at 115°C for 48 hours and 96 hours, followed by gas chromatography analysis to determine the concentrations of H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO, and CO₂. The results indicate that thermal aging promotes the formation of degradation gases, with ethane (C₂H₆) identified as the dominant hydrocarbon gas, while acetylene (C₂H₂) was not detected. Based on the Key Gas Method (KGM) interpretation, the oil condition was classified as overheated oil due to the dominance of C₂H₆ in both samples, and the Duval Triangle placed both samples in the T1 zone, indicating a thermal fault below 300°C. Overall, the results demonstrate that DGA is capable of identifying gas generation characteristics resulting from thermal aging in rubber seed oil, indicating its potential application as a diagnostic method for ester-based transformer insulating oils.

Keywords: rubber seed oil, RSMEO, thermal aging, DGA, transformer insulating oil

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena berkat rahmat serta hidayah-Nya penulis mampu menuntaskan skripsi yang berjudul “Evaluasi Eksperimental Pembentukan Gas Terlarut Akibat *Thermal Aging* pada Minyak Isolasi Transformator Berbasis Minyak Biji Karet”. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu persyaratan akademik untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Elektro Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta.

Terselesaikannya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan berbagai pihak. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Keluarga tercinta yang tidak pernah berhenti mendoakan, menyemangati, dan mendukung setiap langkah penulis hingga skripsi ini selesai.
2. Bapak Dr. Ir. Henry Binsar Hamonangan Sitorus, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing 1 atas segala arahan, ilmu, dan dorongan semangat yang diberikan sepanjang proses penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Muhamad Alif Razi, S.Pi., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing 2 yang selalu menyediakan waktu untuk berdiskusi serta memberikan masukan dan koreksi yang sangat berarti.
4. Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta beserta jajaran dosen dan staf atas fasilitas, layanan akademik, dan dukungan yang diberikan kepada penulis.
5. Pengelola Lab DGA Bukit Rivaria Depok yang telah membantu dan menyediakan sarana selama penelitian berlangsung.
6. Rekan-rekan Teknik Elektro angkatan 2022 dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas segala bantuan dan dukungannya selama pengerjaan skripsi ini.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh sebab itu, segala kritik dan saran yang membangun akan penulis terima dengan terbuka sebagai bahan perbaikan di masa mendatang. Semoga hasil

penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Jakarta, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI	ii
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI UNTUK KEPENTINGAN	
AKADEMIS.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan Penelitian.....	4
BAB 2 LANDASAN TEORI	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Transformator.....	7
2.3 Minyak Isolasi Transformator	10
2.3.1 Minyak Mineral	10
2.3.2 Minyak Ester.....	11
2.3.3 Perbandingan Karakteristik Kimia dan Fisika Minyak Nabati dan Minyak Mineral	11
2.4 Minyak Biji Karet.....	13
2.5 Metode Esterifikasi.....	13
2.6 Metode <i>Thermal Aging</i>	14
2.7 Metode Pengujian DGA	15
2.7.1 Metode Kromatografi Gas	15
2.8 Metode Interpretasi Data DGA	18
2.8.1 <i>Key Gas Method</i> (KGM).....	18
2.8.2 <i>Doernenburg Ratio Method</i> (DRM)	18
2.8.3 <i>Rogers Ratio Method</i> (RRM).....	19
2.8.4 <i>IEC Ratio Method</i> (IRM).....	19
2.8.5 Metode Segitiga Duval	19
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Kerangka Berpikir	22
3.1.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah	22
3.1.2 Studi Literatur	23
3.1.3 Sistem Simulasi <i>Thermal Aging</i>	23
3.1.4 Prosedur Pengujian DGA	26
3.1.5 Interpretasi Hasil Pengujian DGA	31

3.1.6 Hasil dan Kesimpulan.....	32
3.2 Tempat Penelitian.....	32
3.3 Jadwal Penelitian.....	32
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1 <i>Thermal Aging</i>	34
4.2 Pengujian DGA	35
4.2.1 Preparasi Alat Gas Kromatografi.....	36
4.2.2 Proses Pengujian DGA Menggunakan Alat Gas Kromatografi.....	37
4.3 Hasil Pengujian DGA.....	37
4.4 Interpretasi Hasil Pengujian DGA.....	38
4.4.1 Interpretasi Hasil Menggunakan <i>Key Gas Method</i> (KGM).....	38
4.4.2 Interpretasi Hasil Menggunakan Segitiga Duval	39
4.5 Pembahasan Pembuktian Hasil Penelitian	40
BAB 5 PENUTUP.....	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran	44
DAFTAR PUSTAKA	
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Transformator	8
Gambar 2.2 Inti Laminasi Trafo	9
Gambar 2.3 Kumparan Transformator	9
Gambar 2.4 <i>Carrier Gas</i> (Gas Pendorong)	16
Gambar 2.5 <i>Injector</i>	17
Gambar 2.6 <i>Detector</i>	17
Gambar 2.7 <i>Data System (Recorder/Computer)</i>	17
Gambar 2.8 Segitiga Duval	19
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	22
Gambar 3.2 Uji Ketahanan Vial	25
Gambar 3.3 Oven Oxone OX-858BR	26
Gambar 3.4 Kalibrasi Suhu Oven.....	26
Gambar 3.5 Alat <i>Sampling</i> Minyak Isolasi	28
Gambar 3.6 Proses Ekstraksi Gas dengan Metode <i>Shake Test</i>	29
Gambar 3.7 Skema <i>Shake Test</i> Berdasarkan IEC 60567.....	29
Gambar 3.8 Skema Alat <i>Gas Chromatograph</i> Berdasarkan IEC 60567:2005	30
Gambar 4.1 Kondisi Sampel Sebelum dan Sesudah Pemanasan.....	35
Gambar 4.2 Proses <i>Thermal Aging</i> pada Sampel	35
Gambar 4.3 Proses Preparasi Alat Gas Kromatografi 1	36
Gambar 4.4 Proses Preparasi Alat Gas Kromatografi 2	36
Gambar 4.5 Proses Injeksi Sampel ke Alat Gas Kromatografi	37
Gambar 4.6 Perangkat Lunak PPMreport by Morgan Schaffer	37
Gambar 4.7 Hasil Segitiga Duval Sampel 48 Jam	39
Gambar 4.8 Hasil Segitiga Duval Sampel 96 Jam	40

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
Tabel 2.2 Perbandingan Gas Terlarut pada Minyak Mineral dan Minyak Nabati	12
Tabel 2.3 Perbandingan Karakteristik Minyak Mineral dan Minyak Nabati	12
Tabel 2.4 Batas Konsentrasi Minimum Rasio Doernenburg.....	18
Tabel 2.5 Koordinat Sumbu Segitiga Duval Berdasarkan Persen Gas.....	20
Tabel 3.1 Variasi Temperatur.....	24
Tabel 3.2 <i>Key Gas Method</i> (KGM)	31
Tabel 3.3 Temperatur Operasi Transformator Berdasarkan IEEE C57.91	24
Tabel 3.4 Kelompok Gas yang Dideteksi Alat Micro GC.....	30
Tabel 3.5 Jadwal Penelitian.....	33
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Sampel Pemanasan 48 Jam	37
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Sampel Pemanasan 96 Jam	38
Tabel 4.3 Interpretasi Hasil Menggunakan <i>Key Gas Method</i> (KGM).....	38
Tabel 4.4 Interpretasi Hasil Menggunakan Segitiga Duval.....	39

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Memasukkan Sampel ke Dalam <i>Syringe</i>	25
Lampiran 2 Pengujian DGA Menggunakan Sampel.....	51
Lampiran 3 Pemanasan RSMEO.....	52
Lampiran 4 Kalibrasi Volume Vial.....	52
Lampiran 5 Peletakan Sampel Sebelum Dimasukkan ke <i>Syringe</i>	53
Lampiran 6 <i>Before–After</i> Pemanasan.....	53
Lampiran 7 Kulit Terkena Bidang Panas	53
Lampiran 8 <i>CO₂ Trap</i>	54
Lampiran 9 Proses Pemasukan Udara	54
Lampiran 10 Kalibrasi Suhu Oven.....	55
Lampiran 11 Pengujian Tutup Vial Menggunakan Airfryer.....	55