

Studi Efek Penuaan Termal Terakselerasi pada Degradasi Dielektrik Breakdown Minyak Mineral dan Minyak Nabati sebagai Alternatif

Bella Eliana^{1*}, Jakariya¹, Siti Saodah¹, Ahmad Deni¹, Christine Widyastuti², Irawan²

¹Teknik Konversi Energi, D4-Teknologi Pembangkit Tenaga Listrik, Politeknik Negeri Bandung

²Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Teknik Tenaga Listrik, Institut Teknologi PLN

E-mail: bella.eliana@polban.ac.id*

Abstract

This study investigates the degradation of breakdown voltage and dielectric strength of mineral oil type Nynas and pure soybean oil used as transformer insulation under accelerated thermal aging at 150°C for 800 hours. Sampling was conducted every 200 hours, and parameters were measured using standard electrode methods following IEC guidelines. Results show that mineral oil experiences significant exponential decay in electrical properties, indicating rapid chemical degradation. In contrast, soybean oil exhibits greater stability during initial and mid-aging phases, although a marked decline accompanied by gel formation occurs at later stages (600–800 hours). The exponential decay model fits the mineral oil degradation data, while the second-order polynomial model better represents the nonlinear degradation pattern of soybean oil. This study highlights the potential of soybean oil as an environmentally friendly insulation alternative, with attention needed on its physical stability during long-term use.

Keywords: Breakdown Voltage, Dielectric Strength, Mineral Oil, Soybean Oil, Thermal Aging

Abstrak

Penelitian ini membahas degradasi tegangan breakdown dan kekuatan dielektrik minyak mineral tipe Nynas dan minyak kedelai murni sebagai isolasi transformator di bawah penuaan termal terakselerasi pada suhu 150°C selama 800 jam. Pengujian dilakukan dengan interval 200 jam menggunakan metode elektroda jamur sesuai standar IEC. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa minyak Nynas mengalami penurunan eksponensial pada seluruh parameter kelistrikan, menandakan degradasi kimiawi yang cepat. Sebaliknya, minyak kedelai murni menunjukkan ketahanan lebih baik pada fase awal hingga menengah aging, meskipun terjadi penurunan yang signifikan dan pembentukan gel pada tahap lanjut (600–800 jam). Model eksponensial sesuai untuk minyak mineral, sedangkan model polinomial orde dua lebih tepat untuk menggambarkan pola degradasi minyak nabati. Studi ini memperkuat potensi minyak kedelai murni sebagai alternatif ramah lingkungan, namun perlu perhatian khusus terhadap stabilitas fisik pada penggunaan jangka panjang.

Kata kunci: Degradasi Minyak Isolasi, Kekuatan Dielektrik, Minyak Kacang Kedelai, Minyak Mineral Nynas, Penuaan Termal

1. Pendahuluan

Transformator memiliki fungsi vital dalam sistem kelistrikan, yakni mengatur dan menyalurkan tegangan dari pembangkit listrik ke

konsumen secara andal dan aman [1, 2]. Kinerja transformator bergantung pada sistem isolasi yang melekat, terutama minyak isolasi yang berperan ganda sebagai media isolasi listrik dan pendingin [2]. Minyak isolasi berfungsi untuk mencegah

gangguan listrik antar kumparan dan komponen, sekaligus menghilangkan panas yang dihasilkan selama operasi transformator. Namun, selama pemakaian, minyak isolasi mengalami degradasi, terutama akibat efek penuaan termal dan tegangan listrik yang menurunkan kekuatan dielektriknya [3, 4]. Penurunan ini meningkatkan risiko kegagalan isolasi dan kerusakan transformator, sehingga menimbulkan kerugian operasional yang signifikan.

Minyak mineral telah lama menjadi standar sebagai media isolasi transformator karena karakteristik listrik dan termal yang baik. Namun, munculnya keprihatinan lingkungan dan keterbatasan sumber daya telah mendorong penelitian terhadap minyak nabati sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan. Minyak nabati, termasuk minyak kedelai murni, memiliki potensi karakteristik dielektrik yang baik dan bidegradabilitas yang tinggi [5, 6, 7, 8]. Meskipun demikian, kemampuan minyak nabati mempertahankan kekuatan dielektrik selama penuaan termal terakselerasi masih menjadi area penelitian yang berkembang dan belum tereksplorasi secara menyeluruh.

Berbagai studi telah membahas degradasi sifat dielektrik minyak isolasi, tetapi perbandingan kuantitatif antara minyak mineral dan minyak nabati dalam kondisi penuaan termal terakselerasi masih terbatas, khususnya terkait fenomena fisik seperti gelasi pada minyak nabati. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi kekosongan tersebut dengan melakukan analisis komparatif degradasi tegangan breakdown dan kekuatan dielektrik antara minyak mineral tipe Nynas dan minyak kedelai murni dalam kondisi penuaan termal terakselerasi selama 800 jam dengan interval pengambilan sampel setiap 200 jam.

Penelitian ini didasari oleh eksperimen menggunakan accelerated thermal aging chamber yang telah dikembangkan di laboratorium kami. Accelerated thermal aging chamber ini mampu mengontrol temperatur secara konstan untuk mensimulasikan kondisi penuaan yang dipercepat. Istilah terkontrol menggambarkan bahwa selama proses pemanasan, temperatur kerja dijaga konstan dan stabil menggunakan sistem kontrol otomatis dalam aging chamber tersebut. Pada penelitian ini, temperatur yang diaplikasikan adalah 150°C, yang dikategorikan sebagai temperature ekstrem untuk operasi kerja transformator. Dengan menjaga suhu secara konstan dan stabil, proses aging dapat direplikasi secara akurat tanpa fluktuasi temperatur yang dapat memengaruhi hasil eksperimen, sehingga memungkinkan evaluasi performa isolasi yang valid dan konsisten secara ilmiah.

Parameter utama yang diukur dalam penelitian ini meliputi tegangan breakdown AC dan DC serta kekuatan dielektrik minyak isolasi selama proses aging. Selain itu, fenomena perubahan fisik seperti pembentukan gel pada minyak kedelai diamati dan dianalisis hubungannya dengan hasil pengukuran tegangan breakdownnya untuk memahami mekanisme degradasi yang terjadi pada minyak nabati. Data hasil pengujian dianalisis secara statistik menggunakan metode regresi untuk mengungkap tren degradasi dan perbedaan performa kedua jenis minyak.

Dengan pendekatan ini, studi diharapkan memberikan kontribusi penting dalam pengembangan alternatif minyak isolasi transformator yang lebih ramah lingkungan tanpa mengorbankan performa isolasi dan kestabilan fisik selama pemakaian panjang. Hasil penelitian diharapkan menjadi referensi yang bermanfaat untuk implementasi minyak nabati dalam sistem isolasi kelistrikan di masa depan.

1.1. Sampel dan Kondisi Penuaan Termal

Penelitian ini menggunakan minyak Nynas sebagai minyak mineral dan minyak kedelai murni sebagai minyak nabati sebagai sampel minyak isolasi yang mengalami penuaan terakselerasi. Penuaan termal sampel dilakukan dengan menggunakan *accelerated thermal aging chamber* yang telah dikembangkan di laboratorium. *Aging chamber* ini menggunakan heater terendam mengikuti standar IEC 60076-7 untuk penuaan termal minyak isolasi transformator [4]. Tampilan skematis dari Aging Chamber ditunjukkan pada Gambar 1.

Dalam proses ini, minyak dipanaskan bersama dengan kertas isolasi kraft dalam perbandingan tertentu sesuai standar IEC 61198, yaitu perbandingan minyak dan kertas sebesar 30:1, berdasarkan berat. Hal ini mensimulasikan kondisi nyata pada transformator dimana minyak dan kertas isolasi saling berinteraksi dan mengalami penuaan secara simultan.

Penentuan suhu penuaan dilakukan pada 150°C, yaitu suhu yang umum digunakan dalam percepatan penuaan termal menyesuaikan standar IEEE dan IEC untuk mempercepat proses degradasi tanpa mengubah mekanisme kerusakan alami. Suhu tersebut dijaga tetap konstan dan diawasi secara ketat menggunakan termokopel yang dipasang di dalam *aging chamber* untuk memastikan kestabilan suhu dan distribusi panas yang homogen selama waktu penuaan termal.

Interval waktu penuaan ditetapkan pada 0 (minyak dalam keadaan baru dan masih segar), 200, 400, 600, dan 800 jam. Seluruh proses diawasi dengan sistem kontrol otomatis,

menjamin kondisi penuaan konsisten dan merefleksikan beban panas berkelanjutan yang sering dialami oleh minyak isolasi dalam operasi transformator. Spesifikasi sampel dapat dilihat seperti pada Tabel 1.

2. Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimen laboratorium menggunakan sampel minyak isolasi tipe Nynas dan minyak kedelai murni, dengan 6 sampel untuk masing-masing jenis minyak. Proses aging termal diterapkan pada temperature 150°C selama 800 jam, dengan interval pengambilan sampel uji setiap 200 jam untuk melakukan evaluasi degradasi.

Kondisi kontrol dalam eksperimen mencakup pengaturan perbandingan berat minyak terhadap kertas kraft sebesar 30:1, sesuai dengan standar IEC 61198, yang mensimulasikan kondisi isolasi riil pada transformator. Temperature aging dipertahankan konstan dan dikontrol ketat menggunakan termokopel yang dipasang di dalam accelerated thermal aging chamber, sehingga proses penuaan termal berlangsung secara terkontrol dan stabil.

Pengujian breakdown voltage dilakukan sesuai standar IEC 156 dengan menggunakan elektroda berbentuk jamur atau setengah bola yang berfungsi untuk mengukur tegangan breakdown AC dan DC. Setiap sampel yang dilakukan pengujian diulang sebanyak 6 kali untuk setiap sampel agar diperoleh data yang valid dan reliabel, dan nilai rata-rata diperoleh melalui probabilitas *Weibull* 63,2% dengan mengecualikan data ekstrem untuk menghindari outlier yang dapat memengaruhi hasil.

Fenomena gelasi pada minyak kedelai diamati secara visual melalui perubahan fisik selama aging dan dianalisis secara kualitatif berdasarkan kajian literatur yang menjelaskan proses agregasi molekul asam lemak bebas dan fosfolipid yang terjadi saat aging lanjut. Metode ini memberikan gambaran awal tentang perubahan fisik yang berpotensi memengaruhi performa isolasi minyak nabati.

Kemudian, analisis regresi matematis untuk memvalidasi tren atau perilaku degradasi pada kedua jenis minyak secara kuantitatif juga dilakukan. Data hasil pengukuran tegangan breakdown dan kekuatan dielektrik dianalisis dengan menggunakan metode regresi. Goodness-of-fit digunakan untuk mengevaluasi kecocokan model regresi terhadap data eksperimen, sehingga validitas dari model matematis yang digunakan untuk menerangkan laju degradasi dapat dipertanggungjawabkan. Dengan analisis regresi

ini, penelitian tidak hanya menyajikan data empiris, tetapi juga memberikan karakterisasi matematis yang memungkinkan prediksi perilaku degradasi minyak isolasi pada kondisi aging terakselerasi.

2.1. Pengujian Tegangan Breakdown

Dalam penelitian ini, uji tegangan *breakdown* dilakukan dengan menggunakan sistem elektroda untuk menganalisis karakteristik elektrik minyak transformator yang telah mengalami penuaan. Sistem elektroda terdiri dari sepasang elektroda berbentuk setengah lingkaran atau biasa juga disebut dengan elektroda berbentuk jamur, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2 dan spesifikasinya pada Tabel 2 sesuai dengan IEC 156 [9]. Tegangan AC 50 Hz diterapkan pada elektroda berbentuk jamur, sedangkan elektroda berbentuk jamur lainnya dihubungkan dengan *ground*. Tampilan skematis pengujian tegangan *breakdown* dapat dilihat pada Gambar 3. Tingkat peningkatan tegangan AC diatur ke 2 kV/s. Tegangan DC juga diterapkan pada percobaan ini dan laju peningkatan tegangan DC diatur ke 2 kV/s. Percobaan diulang 6 kali dalam kondisi yang sama dan data tegangan *breakdown* dengan mengecualikan data ekstrim diambil untuk menganalisis karakteristik dielektrik. Dalam penelitian ini, tegangan *breakdown* pada *sparkover* menunjukkan nilai rata-rata hasil eksperimen dengan probabilitas *Weibull* *breakdown* sebesar 63,2%.

Tabel 1.
Spesifikasi Sampel

No	Sampel	Bahan	Deskripsi
1	Volume minyak isolasi	-	2,9 L
2	Minyak isolasi	Minyak mineral Minyak nabati	Tipe Nynas Kacang Kedelai Murni
3	Kertas Isolasi	Isolasi kertas KRAFT	Ketebalan: 0,15 mm

Tabel 2.
Spesifikasi sistem elektroda

No	Sample	Deskripsi
1	Sistem elektroda	<i>Mushroom-shaped</i> (setengah lingkaran)
2	Diameter elektroda [mm]	50

3	Jarak sela [mm]	2,5
4	Suhu lingkungan [°C]	25
5	Suhu penuaan [°C]	150
6	Tegangan yang diaplikasikan	AC, DC



Gambar 1. Tampilan skematis *Accelerated Thermal Aging Chamber*.



Gambar 2. Sistem elektroda



Gambar 3. Tampilan skematis uji tegangan *breakdown*

2.2. Metode Regresi

Analisis regresi merupakan teknik statistik yang berguna untuk memodelkan hubungan antara variabel dependen dan variabel independent. Dalam penelitian ini, regresi

digunakan untuk memetakan tren degradasi tegangan *breakdown* dan kekuatan dielektrik selama aging termal. Model regresi eksponensial umum yang digunakan memiliki bentuk persamaan (1):

$$y = ae^{bx} \quad (1)$$

dimana y Adalah variabel dependen (misalnya: tegangan *breakdown*), x Adalah waktu atau umur penuaan, dan a, b Adalah koefisien regresi yang dihitung dari data. Regresi eksponensial memungkinkan sesuai untuk minyak mineral Nynas yang menunjukkan degradasi kontinu secara logaritmik.

Sedangkan model regresi polynomial orde-2 yang digunakan untuk minyak kedelai murni memiliki persamaan (2) sebagai berikut:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (2)$$

dimana $a_0, a_1,$ dan a_2 adalah koefisien yang menggambarkan pola degradasi tidak linier dengan dua fase, yakni stabil di awal dan penurunan tajam di fase lanjut.

Evaluasi kesesuaian model dilakukan dengan koefisien determinasi R^2 , yang mengukur proporsi variansi data yang dapat dijelaskan model. Peneliti menggunakan nilai R^2 sebagai satu-satunya indikator *goodness-of-fit* dalam penelitian ini. Standar interpretasi R^2 adalah: nilai $\geq 0,67$ dianggap kuat, $0,33-0,67$ sedang, dan $\leq 0,33$ lemah. Model dengan nilai R^2 moderat hingga tinggi dianggap valid untuk menggambarkan tren degradasi minyak isolasi.

3. Hasil dan Pembahasan

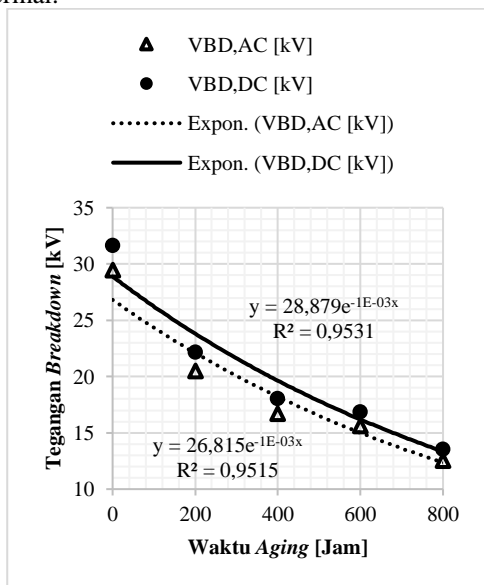
3.1. Hasil Eksperimen

Pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisis degradasi tegangan *breakdown* dan kekuatan dielektrik antara dua jenis minyak isolasi transformator, yaitu minyak Nynas dan minyak kedelai murni, yang dipaparkan pada kondisi penuaan termal terakselerasi selama jangka waktu 800 jam pada suhu 150°C dengan interval pengambilan sampel setiap 200 jam. Hasil eksperimen yang disajikan pada Gambar 5, Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8 mengindikasikan adanya trend penurunan parameter $V_{BD,AC}$, $V_{BD,DC}$, $E_{BD,AC}$, dan $E_{BD,DC}$ seiring dengan berjalannya waktu penuaan pada kedua jenis minyak tersebut. Hasil pengujian tegangan *breakdown* ditunjukkan oleh Gambar 5

dan Gambar 6 untuk minyak Nynas dan minyak kedelai murni, secara berurutan. Pada Gambar 5 dan Gambar 6, memperlihatkan tren penurunan $V_{BD,AC}$ dan $V_{BD,DC}$ pada kedua jenis minyak seiring waktu penuaan.

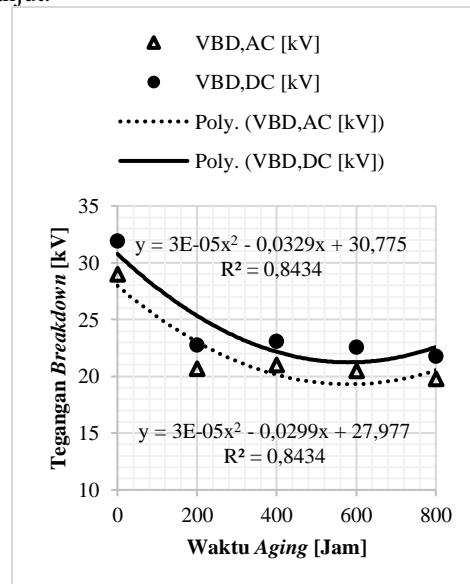
Minyak Nynas dan minyak kedelai murni mengalami penurunan tegangan *breakdown* (V_{BD}) dan kekuatan dielektrik (E_{BD}) seiring waktu penuaan termal. Pada awal waktu penuaan, minyak Nynas memiliki $V_{BD,AC}$ sebesar 29,4 kV dan $V_{BD,DC}$ 31,6 kV, serta $E_{BD,AC}$ 11,78 kV/mm dan $E_{BD,DC}$ 12,65 kV/mm. Minyak kedelai murni memiliki $V_{BD,AC}$ 29 kV, $V_{BD,DC}$ 31,9 kV, $E_{BD,AC}$ 11,6 kV/mm, dan $E_{BD,DC}$ 12,76 kV/mm. Kedua minyak menunjukkan karakteristik awal yang kuat sebagai media isolasi.

Seiring dengan peningkatan waktu penuaan, minyak Nynas menunjukkan penurunan signifikan dalam tegangan *breakdown* dan kekuatan dielektrik. Tegangan *breakdown* AC dan DC menurun secara eksponensial dari nilai awal menjadi 12,51 kV dan 13,52 kV pada 800 jam waktu penuaan, secara berurutan, menunjukkan degradasi kinerja isolasi yang cukup drastis dalam rentang waktu tersebut. Penurunan kekuatan dielektrik membentuk tren serupa, dimana kekuatan dielektrik turun secara eksponensial. Kekuatan dielektrik AC dan DC dari minyak Nynas turun secara eksponensial menjadi 5,01 kV/mm dan 5,41 kV/mm, secara berurutan. Tren penurunan ini bersifat eksponensial, mengindikasikan terjadinya degradasi kimia yang dipercepat pada minyak mineral akibat penuaan termal.

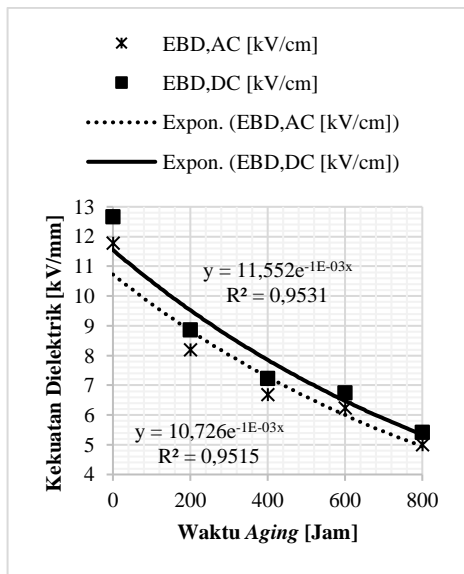


Gambar 4. Tegangan breakdown dari minyak Nynas terhadap waktu *aging*.

Pada minyak kedelai murni mengalami penurunan tegangan *breakdown*, namun menunjukkan kestabilan yang lebih baik. Tegangan *breakdown* dibawah tegangan AC dari minyak kedelai murni turun dari 29 kV menjadi 19,8 kV, sedangkan pada tegangan DC nilai turun dari 31,9 kV menjadi 21,78 kV setelah 800 jam penuaan. Demikian pula, nilai kekuatan dielektriknya pada AC dan DC minyak kedelai murni pada akhir penuaan masing-masing 7,92 kV/mm dan 8,71 kV/mm, secara berurutan. Penurunan parameter pada minyak kedelai cenderung lebih lambat, terutama setelah 400 jam, di mana nilainya stabil tanpa penurunan drastis, memperlihatkan ketahanan molekuler minyak nabati terhadap degradasi termal. Namun, disatu sisi penurunan nilai tegangan *breakdown* mulai terjadi secara konstan pada penuaan 600 jam hingga 800 jam. Hal ini menunjukkan tanda-tanda degradasi isolasi yang mulai nyata pada tahap lanjut.

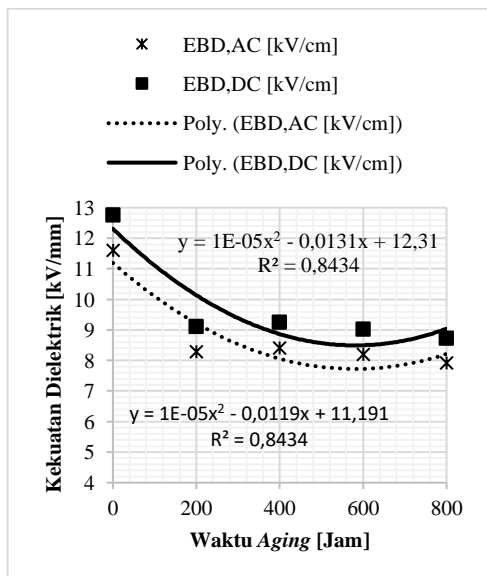


Gambar 5. Tegangan breakdown dari minyak kedelai murni terhadap waktu *aging*.



Gambar 6. Kekuatan dielektrik dari minyak Nynas terhadap waktu aging

Model peluruhan eksponensial diterapkan pada data minyak Nynas yang memperlihatkan pola penurunan kontinu dan progresif, mencerminkan mekanisme degradasi kimiawi yang sistematis dan linier secara logaritmik. Sebaliknya aplikasi model polinomial orde dua pada minyak nabati lebih tepat untuk menggambarkan karakter penurunannya yang tidak linier dan didominasi oleh dua fase, yaitu fase awal hingga menengah yang relatif stabil diikuti penurunan lebih signifikan pada fase lanjut.



Gambar 7. Kekuatan dielektrik dari minyak kedelai murni terhadap waktu aging

3.2. Pembahasan

Minyak isolasi dalam transformator berperan ganda sebagai media isolasi listrik dan pendingin, melindungi transformator dari kerusakan akibat panas dan tegangan listrik [2, 10]. Namun, selama operasi, minyak isolasi mengalami degradasi kimia dan fisik, terutama disebabkan oleh penuaan termal dan stres listrik [3, 4, 11, 12]. Menurut Kind (2003) dan Sirait (2010), penuaan termal mempercepat oksidasi minyak yang menghasilkan produk sampingan seperti asam lemak bebas, sludge, dan gas terlarut yang menurunkan kemampuan dielektrik minyak [13,14].

Proses oksidasi ini dipengaruhi oleh tiga faktor utama: suhu, air, dan oksigen. Suhu tinggi mempercepat reaksi kimia oksidasi; air dan oksigen bertindak sebagai katalis yang mengintensifkan degradasi [13, 14]. Dalam kondisi penuaan terakselerasi yang diaplikasikan dalam penelitian ini, suhu dijaga konstan di level tinggi untuk mensimulasikan efek penuaan dalam waktu singkat.

Data eksperimen menunjukkan bahwa minyak mineral tipe Nynas mengalami penurunan tegangan breakdown AC dan DC secara signifikan selama penuaan dari nilai awal masing-masing 29,44 kV dan 31,63 kV hingga menjadi 12,51 kV dan 13,52 kV pada 800 jam. Kekuatan dielektrik juga menurun drastis dari 11,78 kV/mm dan 12,65 kV/mm ke kisaran 5 – 5,5 kV/mm. Pola penurunan ini konsisten dan dapat dimodelkan menggunakan fungsi regresi peluruhan eksponensial seperti pada Tabel 3, yang merefleksikan degradasi kimiawi berkelanjutan dan linier secara logaritmik [13, 14].

Tabel 3.
Persamaan regresi minyak mineral tipe Nynas

Parameter	Persamaan Regresi	R ²
V _{BD,AC}	$y = 26,815e^{-1E-03x}$	0,9515
V _{BD,DC}	$y = 28,879e^{-1E-03x}$	0,9531
E _{BD,AC}	$y = 10,726e^{-1E-03x}$	0,9515
E _{BD,DC}	$y = 11,552e^{-1E-03x}$	0,9531

Penurunan nilai V_{BD} dan E_{BD} ini menandakan berkurangnya kapasitas isolasi listrik minyak mineral akibat akumulasi produk oksidasi yang merusak struktur molekul dan meningkatkan konduktivitas listriknya. Hal ini sejalan dengan temuan IEEE C57.100-2011 yang mengaitkan umur teknis minyak isolasi dengan laju degradasi yang dipengaruhi oleh temperatur operasi puncak [15].

Sedangkan, minyak kedelai murni menunjukkan ketahanan oksidatif yang lebih tinggi. Sepanjang interval penuaan hingga 400 jam, penurunan kemampuan dielektriknya lebih lambat dan stabil dibanding minyak mineral. Perbedaan ini berkaitan erat dengan komposisi kimia minyak kedelai murni yang kaya asam lemak tak jenuh dan antioksidan, sehingga reaksi oksidasi berjalan lebih moderat dan perlambatan degradasi sifat isolasi dapat terjadi.

Namun, pada pengambilan sampel penuaan pada 600 dan 800 jam, teramati fenomena pembentukan *gel* pada minyak kedelai murni. Pembentukan *gel* ini merupakan manifestasi perubahan fisik sebagai akibat dari reaksi kimia lanjutan selama penuaan termal. Proses gelasi dipicu oleh kristalisasi dan agregasi molekul asam lemak bebas, fosfolipid, dan komponen minor minyak yang cenderung membentuk struktur organogel di lingkungan suhu tinggi serta interaksi dengan air maupun kontaminan lain [16]. Kinetika pemanasan menyebabkan denaturasi dan aglomerasi protein atau komponen polimerik yang ada, sehingga mampu mengubah tekstur minyak dari cair menjadi semi-solid *lump*, sering disebut juga sebagai “*curd*” atau “*gel globule*” pada minyak nabati [17].

Secara praktis, pembentukan *gel* ini berimplikasi negatif pada performa minyak sebagai isolasi transformator. Selain menurunkan kekuatan dielektrik, gelasi dapat meningkatkan viskositas, mengganggu sirkulasi dan pendinginan minyak, serta memperbesar risiko kegagalan isolasi akibat ketidakstabilan tekstur dan permukaan kontak minyak dengan bahan isolasi padat [18.]. Hal ini membatasi umur pakai minyak kedelai murni, terutama pada aplikasi jangka Panjang yang memerlukan kestabilan fisik dan kimia di bawah penuaan termal intensif.

Temuan pembentukan *gel* di minyak kedelai murni pada *aging* lanjut menjadi sinyal perlunya pengembangan formula atau penambahan aditif antioksidan atau *anti-gel* pada minyak nabati agar sifat kelistrikan dan fisik tetap optimal bahkan setelah pemakaian lama. Studi lanjutan secara mikroskopi dan analisis spektroskopi molekuler terhadap minyak nabati, khususnya minyak kedelai murni, di penuaan lanjut sangat penting untuk memahami mekanisme gelasi dan mengusulkan solusi preventif dalam desain minyak isolasi ramah lingkungan masa depan.

Model polinomial orde dua yang diterapkan dengan baik pada data minyak nabati secara matematis mampu menggambarkan karakter penurunannya yang tidak linier dan didominasi oleh dua fase, yaitu fase awal hingga menengah yang relatif stabil diikuti penurunan lebih

signifikan pada fase lanjut. Hal ini dapat dilihat melalui persamaan regresi pada Tabel 4.

Tabel 4.
Persamaan regresi minyak kedelai murni

Parameter	Persamaan Regresi	R ²
V _{BD,AC}	$y = 3e - 05x^2 - 0,0299x + 27,977$	0,8434
V _{BD,DC}	$y = 3e - 05x^2 - 0,0329x + 30,775$	0,8434
E _{BD,AC}	$y = 1e - 05x^2 - 0,0119x + 11,191$	0,8434
E _{BD,DC}	$y = 1e - 05x^2 - 0,0131x + 12,31$	0,8433

Analisis regresi ini memberikan landasan kuantitatif untuk memahami perilaku degradasi sifat kelistrikan minyak isolasi selama aging termal. Nilai R² yang tinggi pada model eksponensial minyak mineral menunjukkan kesesuaian yang sangat baik, sedangkan nilai sedikit lebih rendah pada model polinomial minyak kedelai mencerminkan degradasi yang lebih kompleks akibat adanya gelasi.

Pendekatan ini memperkuat hasil eksperimen empiris dan menyediakan model matematis yang dapat digunakan untuk memprediksi perilaku aging serta mendukung strategi pengelolaan dan pengembangan minyak isolasi yang lebih tahan penuaan termal. Dengan demikian, penelitian ini menyediakan dasar ilmiah kuat untuk pengembangan minyak isolasi alternatif yang aman lingkungan dan efisien.

3.3. Keterbatasan Penelitian

Pada penelitian ini, analisis yang dilakukan belum mencakup pemeriksaan mikroskopis dan spektroskopi secara mendalam untuk mengidentifikasi secara langsung komposisi dan struktur gelasi yang terbentuk pada minyak nabati selama *aging*. Tanpa data ini, mekanisme kimiawi dan fisik yang menyebabkan gelasi hanya dapat diperkirakan berdasarkan perubahan fisik dan data sekunder dari literatur. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang melibatkan teknik mikroskopi (SEM/TEM) dan spektroskopi molekuler (FTIR, Raman, NMR) sangat diperlukan untuk mengungkap mekanisme pembentukan gel secara lebih tepat dan detail. Studi lanjutan juga disarankan untuk mengeksplorasi solusi teknis peningkatan stabilitas fisik minyak nabati, misalnya melalui pengembangan formulasi aditif antioksidan atau *anti-gel*, proses pemurnian khusus, atau modifikasi kimiawi struktural. Pendekatan ini diperlukan agar minyak nabati dapat digunakan secara lebih luas dan handal sebagai alternatif

minyak isolasi ramah lingkungan dalam aplikasi transformator jangka panjang.

4. Simpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa baik minyak mineral Nynas maupun minyak kedelai murni mengalami penurunan tegangan breakdown dan kekuatan dielektrik sebagai akibat penuaan termal terakselerasi pada suhu 150°C. Namun, pola dan laju degradasi kedua minyak berbeda signifikan. Minyak Nynas menunjukkan penurunan eksponensial yang konsisten pada seluruh parameter kelistrikkannya, mencerminkan mekanisme degradasi kimiawi cepat yang berjalan linier secara logaritmik. Di sisi lain, minyak kedelai murni memperlihatkan kestabilan performa dielektrik yang lebih baik hingga pertengahan masa penuaan, namun setelah 600 dan 800 jam terjadi penurunan lebih signifikan yang berkaitan erat dengan ditemukannya gel atau lump sebagai hasil reaksi lanjut dan perubahan fisik. Model polinomial orde dua lebih tepat menggambarkan fenomena penurunan tidak linier pada minyak kedelai, dengan dua fase utama: fase stabil awal-menengah dan fase turun tajam pada aging lanjut. Temuan ini mengindikasikan potensi minyak nabati, khususnya minyak kedelai, sebagai alternatif lebih ramah lingkungan dibandingkan minyak mineral, walaupun diperlukan perhatian khusus untuk stabilitas fisik pada masa pemakaian lama.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan finansial, non-finansial, atau kepentingan pribadi yang dapat memengaruhi pelaksanaan, analisis, maupun pelaporan hasil penelitian ini. Penelitian dilaksanakan sepenuhnya dengan dana internal institusi akademik tanpa dukungan dari industri minyak isolasi atau pihak terkait, sehingga menjamin objektivitas dan kredibilitas ilmiah secara penuh.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Politeknik Negeri Bandung pada tahun 2025 melalui skema Penelitian Kerja Sama (PKS). Kami mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung atas dukungan administrasi selama penyelesaian penelitian ini dan Departemen Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung atas dukungannya. (Nomor hibah: 133.4/R7/PE.01.03/2025)

Daftar Pustaka

- [1] Agarwala A, Tahsin T, Ali MF, Sarker SK, Abhi SH, Das SK, Das P, Hasan MM, Tasneem Z, Islam MM, Islam MR. Towards next generation power grid transformer for renewables: Technology review. *Engineering Reports*. 2024 Apr;6(4):e12848. DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.12848>
- [2] Luo Y, Zhou X, Zhu L, Bai J, Tian T, Liu B, Zhang H. Transformer oil electrical-thermal characteristics analysis and evaluation. *Aip Advances*. 2024 Jul 1;14(7). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0206033>
- [3] Saodah S, Eliana B, Jakariya J. Studi pengaruh penuaan minyak trafo terhadap karakteristik dielektrik. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*. 2023 Aug 10;3(2):83-90. DOI: <https://doi.org/10.35313/jitel.v3.i2.2023.83-90>
- [4] Hemalatha N, Kamaraja AS, Bhuvanesh A, Karthik Kumar K. Analysis on insulating characteristics of natural high oleic ester and mineral oil based blended oil under accelerated thermal aging exposure. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024 Dec;14(23):30383-400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04842-1>
- [5] Rafiq M, Lv YZ, Zhou Y, Ma KB, Wang W, Li CR, Wang Q. Use of vegetable oils as transformer oils—a review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015 Dec 1;52:308-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.032>
- [6] Siddique A, Shahid MU, Aslam W, Atiq S, Altimania MR, Munir HM, Zaitsev I, Kuchanskyy V. Sustainable Insulating Materials for High-Voltage Equipment: Dielectric Properties of Green Synthesis-Based Nanofluids from Vegetable Oils. *Sustainability*. 2025 Feb 19;17(4):1740. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17041740>

- [7] Azli SA, Rahiman MH, Yusoff ZM, Razali NF, Abd Wahid SS, Ramli MS. A review on alternative oils as dielectric insulating fluids on power transformer. In 2019 IEEE 15th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA) 2019 Mar 8 (pp. 198-201). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSPA.2019.8695983>
- [8] Su Z, Zeng Z, Chen R, Wu X, Tang C. Thermal aging performance of soybean insulating oil mixed with glyceryl triacetate. *AIP Advances*. 2024 Apr 1;14(4). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0191566>
- [9] IEC 156
- [10] Raj RA, Ravi S, Yahya A, Mosalaosi M. An overview of potential liquid insulation in power transformer. *International Journal on Energy Conversion*. 2020;8(4):126-40. DOI: <https://doi.org/10.15866/irecon.v8i4.19213>
- [11] Prasajo RA, Priambodo KB, Herdiansyah AS, Duanaputri R, Nurhadi S. Evaluasi Kinerja Sistem Isolasi Transformator Kertas Kraft Terendam Minyak Mineral Pada Sel Uji Penuaan Termal Dipercepat. *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*. 2022 Oct 28;9(3):87-92. DOI: <https://doi.org/10.33795/elposys.v9i3.640>
- [12] Mahanta DK, Laskar S. Electrical insulating liquid: A review. *Journal of advanced dielectrics*. 2017 Aug 11;7(04):1730001. DOI: <https://doi.org/10.1142/S2010135X17300018>
- [13] D. Kind, *Dielectric Properties of Transformer Oils*. Springer, 2003.
- [14] K. T. Sirait, *Pengantar Minyak Isolasi dan Penuaan Minyak Transformator*. ITB Press, 2010.
- [15] IEEE Std C57.100-2011, *Guide for Transformer Loading and Loss Evaluation*.
- [16] Borriello A, Miele NA, Masi P, Aiello A, Cavella S. Effect of fatty acid composition of vegetable oils on crystallization and gelation kinetics of oleogels based on natural wax. *Food Chemistry*. 2022 May 1;375:131805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131805>
- [17] Brodkorb A, Croguennec T, Bouhallab S, Kehoe JJ. Heat-induced denaturation, aggregation and gelation of whey proteins. In *Advanced dairy chemistry: volume 1B: proteins: applied aspects 2016* (pp. 155-178). New York, NY: Springer New York. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2800-2_6
- [18] Fontes DH, Ribatski G, Bandarra Filho EP. Experimental evaluation of thermal conductivity, viscosity and breakdown voltage AC of nanofluids of carbon nanotubes and diamond in transformer oil. *Diamond and Related Materials*. 2015 Sep 1;58:115-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.07.007>