

ANALISA DEGRADASI MINYAK TRANSFORMATOR BERDASARKAN *INTERFACIAL TENSION* DAN *TOTAL ACID NUMBER*

Andre Salomo Simbolon¹, Andi Ulfiana^{1*}, Benhur Nainggolan¹

¹Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta,
Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

E-mail address: andre.salomo.simbolon.tm22@mhs.w.pnj.ac.id andi.ulfiana@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Minyak Isolasi merupakan komponen vital dalam transformator daya yang rentan mengalami degradasi akibat proses oksidasi selama operasional. Penelitian ini menganalisis degradasi minyak isolasi transformator daya unit 1 PT PLN (Persero) Periode 2022 hingga 2025 berdasarkan parameter Interfacial Tension (IFT) dan Total Acid Number (TAN) merujuk pada standar IEC 60422 dan metode Oil Quality Index (OQI). Untuk mengkaji hal tersebut, penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif korelatif berbasis data laboratorium historis. Hasil evaluasi menunjukkan penurunan kualitas buruk pada periode 2022 hingga 2024 dengan nilai OQI <300, kategori sludging oil), dengan nilai IFT menyentuh 18,27 mN/m dan nilai TAN melonjak hingga 0,1093 mg KOH/g serta menghasilkan nilai korelasi pearson positif lemah sebesar 0,362. Intervensi pergantian minyak pada 2025 berhasil memulihkan IFT sebesar 86,30% menjadi 38,36 mN/m dengan nilai OQI 358,50 mutu menengah), namun TAN tetap tinggi dengan nilai 0,1070 mg KOH/g sebagai bukti empiris terjadinya fenomena acid leaching dari pori pori kertas isolasi. Sebagai tindak lanjut, diusulkan penerapan condition based maintenance melalui reklamasi fuller's earth, peningkatan frekuensi uji menjadi enam bulan, serta pengujian furan untuk memastikan kekuatan mekanis kertas isolasi.

Kata-kata kunci: Minyak Isolasi, Transformator Daya, Interfacial Tension, Total Acid Number, Oil Quality Index

Abstract

Insulating oil is a vital component in power transformers that is vulnerable to degradation due to oxidation processes during operation. This study analyzes the degradation of the insulating oil in power transformer unit 1 of PT PLN (Persero) for the period of 2022 to 2025 based on the Interfacial Tension (IFT) and Total Acid Number (TAN) parameters, referring to the IEC 60422 standard and the Oil Quality Index (OQI) method. To investigate this, the study uses a descriptive correlational quantitative approach based on historical laboratory data. The evaluation results show a severe quality deterioration during the 2022 to 2024 period with an OQI value of <300 (sludging oil category), where the IFT value dropped to 18.27 mN/m and the TAN value surged to 0.1093 mg KOH/g, yielding a weak positive Pearson correlation of 0.362. The oil replacement intervention in 2025 successfully recovered the IFT by 86.30% to 38.36 mN/m with an OQI value of 358.50 (fair quality). However, the TAN remained high at 0.1070 mg KOH/g, providing empirical evidence of the acid leaching phenomenon from the pores of the insulation paper. As a follow-up, the implementation of condition-based maintenance is proposed through fuller's earth reclamation, increasing the testing frequency to every six months, and furan testing to ensure the mechanical strength of the insulation paper.

Keywords: Insulating Oil, Power Transformer, Interfacial Tension, Total Acid Number, Oil Quality Index

1. PENDAHULUAN

Transformator daya adalah perangkat yang sangat krusial dalam jaringan kelistrikan. Tugas utama dari transformator ini adalah untuk memodifikasi tingkat tegangan, baik itu dengan meningkatkan maupun menurunkan tegangan. Ketika transformator mengalami kerusakan, hal ini akan berdampak pada distribusi listrik yang menjadi terganggu. Memperbaiki transformator membutuhkan waktu yang lama dan mengeluarkan biaya yang cukup signifikan. Oleh sebab itu, perawatan transformator harus mendapat perhatian khusus untuk mencegah terjadinya kerusakan dan kegagalan fungsi. Salah satu aspek yang sangat krusial adalah bagaimana menjamin kualitas sistem isolasi minyak pada transformator. Selain berfungsi sebagai media isolasi, minyak transformator juga bertindak sebagai pendingin untuk transformator [1]

Minyak transformator adalah jenis bahan isolasi cair yang digunakan untuk tujuan isolasi dan pendinginan pada transformator. Sebagai bahan isolasi, minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan bocor, sementara sebagai pendingin, minyak transformator perlu efektif dalam mengurangi panas yang dihasilkan. Dengan adanya dua kemampuan ini, diharapkan minyak dapat melindungi transformator dari berbagai gangguan [2] degradasi minyak transformator dipengaruhi oleh tiga faktor utama yaitu tegangan termal, tegangan listrik, dan reaksi kimia. Temperatur operasi yang tinggi dapat mempercepat proses oksidasi minyak sehingga menghasilkan senyawa asam dan produk degradasi lainnya. Peningkatan kandungan asam ini dapat meningkatkan viskositas minyak serta menurunkan kemampuan isolasi listrik pada transformator [3] Penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi minyak isolasi berpengaruh besar terhadap tingkat kegagalan transformator, tetapi belum secara mendalam mengkaji hubungan antara parameter kimia seperti *Total Acid Number (TAN)* dan *Interfacial Tension (IFT)* dengan mekanisme dan tingkat degradasi minyak. melakukan penelitian tentang fenomena penuaan minyak transformator melalui uji penuaan termal dipercepat dan sistem isolasi kertas terendam minyak. Meskipun demikian, analisis degradasi yang dilakukan hanya terbatas pada perubahan sifat fisik dan karakteristik dielektrik tanpa eksplorasi yang komprehensif terhadap perubahan kimia yang terjadi selama proses penuaan [4]

Salah satu fenomena yang menyebabkan menurunnya mutu dan ketersediaan pelayanan daya listrik adalah gangguan terhadap minyak transformator, yaitu penyebabnya bisa dari beban transformator yang tinggi, lama pemakaian dari transformator dan adanya degradasi kimia pada minyak transformator ditunjukkan oleh kenaikan *Total Acid Number (TAN)* dan penurunan *Interfacial Tension (IFT)* kedua parameter ini berfungsi sebagai indikator krusial dalam mengevaluasi tingkat kerusakan pada minyak, sebab peningkatan kadar asam menunjukkan adanya proses oksidasi serta pembentukan senyawa polar, sementara penurunan tegangan antar muka mengindikasikan berkurangnya kemampuan minyak dalam melindungi sistem isolasi dari kegagalan dielektrik. Berdasarkan keterbatasan studi terdahulu tersebut, perlu dilakukan penelitian evaluasi yang lebih komprehensif terkait degradasi minyak transformator. Oleh karena itu Penelitian ini berfokus pada pembuktian empiris fenomena acid leaching dan fase pembentukan lumpur menggunakan integrasi analisis statistik korelasi pearson, metode klasifikasi Oil Quality Index (OQI) pada studi kasus nyata di lapangan. serta tingkat degradasi minyak transformator dengan mengacu pada standar IEC 60422, hasil analisis ini tidak hanya difungsikan untuk mendiagnosis kondisi aktual kelayakan minyak, tetapi juga mengidentifikasi potensi ketidaknormalan degradasi seperti fenomenan *acid leaching*, serta menyajikan informasi mengenai kondisi aktual minyak transformator sebagai bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan pemeliharaan [5].

2. METODE PENELITIAN

Berdasarkan Penelitian yang digunakan dalam penulisan ini adalah kuantitatif dengan metode analisis korelasional. data yang digunakan berupa data numerik hasil pengujian laboratorium minyak transformator. analisis dilakukan terhadap parameter *Interfacial Tension* dan *Total Acid Number* untuk menggambarkan kondisi dan tingkat degradasi minyak transformator. Pendekatan kuantitatif digunakan karena kedua parameter tersebut dinyatakan dalam nilai terukur dan dapat dianalisis secara objektif. Metode analisis yang diterapkan bersifat deskriptif korelatif dan evaluasi dengan tujuan hipotesis yang telah ditetapkan.

Objek Data dan Penelitian

Objek penelitian dalam skripsi ini adalah fenomena degradasi minyak transformator unit 1 pada komponen bottom maintank Transformator Daya 150/20kV di Gardu Induk Cawang Baru.



Gambar 1 Transformator Daya

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan mencatat data pengujian laboratorium dan historis hasil pengujian laboratorium terhadap minyak isolasi pada transformator unit 1 150/20kV di Gardu Induk Cawang Baru selama periode februari 2022 hingga februari 2025. Data utama yang dikumpulkan meliputi persentase nilai *Interfacial Tension* yang diuji menggunakan standar ASTM D971 dengan metode cincin *du Nouy* pada tensiometer dan nilai Total Acid Number yang diuji menggunakan standar ASTM D664 dengan metode pengujian titrasi, guna mendiagnosa dan mengevaluasi indikasi endapan lumpur (*sludging*) di Laboratorium PT. PLN (Persero) [6]

Batasan dan Variabel Penelitian

Dibawah ini merupakan ketentuan batasan serta variabel penelitian sebagai berikut:

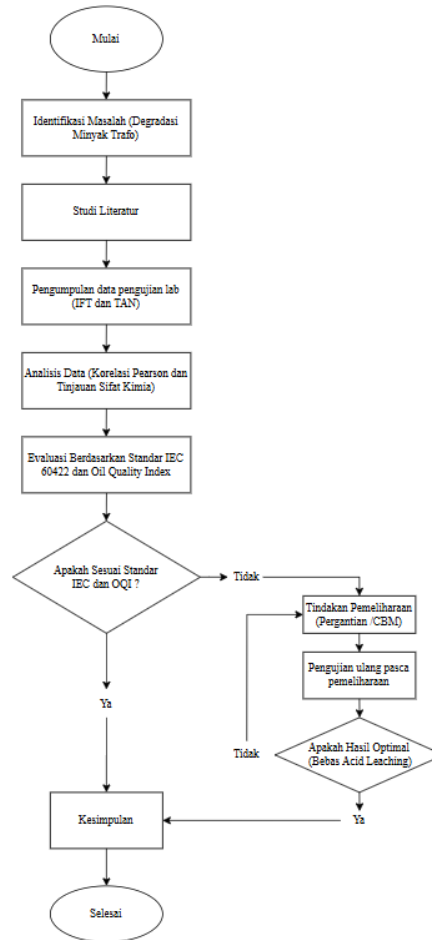
1. Variabel Bebas: waktu operasional transformator yang diperoleh rentang waktu pengamatan histori dari februari 2022 hingga februari 2025.
2. Variabel Terikat: kondisi degradasi minyak isolasi yang direpresentasikan oleh nilai *interfacial tension* dan *total acid number*.
3. Variabel Kontrol: Spesifikasi teknis dari objek yang diteliti, yaitu Transformator Daya Unit 1 kapasitas 150/20kV yang beroperasi di Gardu Induk Cawang Baru.

Data utama yang dikumpulkan meliputi nilai *Interfacial Tension* (IFT) dan *Total Acid Number* (TAN). Pengujian IFT dilakukan merujuk pada standar ASTM D971 menggunakan instrumen tensiometer dengan metode cincin platina-iridium (*Du Noüy ring*). Kondisi batas lingkungan untuk uji IFT ini disyaratkan pada pengondisian suhu sampel secara presisi di angka $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, pengujian nilai TAN dieksekusi berdasarkan standar ASTM D664 menggunakan instrumen titrator potensiometrik otomatis. Proses titrasi ini dilakukan pada kondisi suhu ruang standar laboratorium dengan menggunakan pelarut campuran (toluena, isopropil alkohol, dan air) guna mendiagnosa indikasi senyawa asam dan potensi endapan lumpur (*sludging*)

Metode Analisis Data

Metode Analisis data dilakukan secara kuantitatif deskriptif dan korelasional. Data historis pengujian minyak dievaluasi melalui perhitungan persentase laju perubahan tahunan dan di analisis menggunakan korelasi pearson untuk membuktikan hubungan linear antara parameter *interfacial tension* dan *total acid number*. Tingkat degradasi dan kelayakan operasional minyak kemudian di diagnosis lebih lanjut menggunakan standar IEC 60422:2013 dan metode klasifikasi *Oil Quality Index* (OQI). Hasil dari evaluasi komprehensif tersebut selanjutnya dijadikan landasan perumusan strategi *condition based maintenance* pada transformator [7].

Secara teknis, tahapan pengolahan dan analisis data histori operasional laboratorium periode Februari 2022 hingga Februari 2025 tidak hanya dievaluasi secara matematis, melainkan dipetakan ke dalam alur pemrosesan sekuensial. Alur penelitian dari tahap pengumpulan data hingga penentuan strategi pemeliharaan disajikan secara visual pada Gambar Diagram Alir berikut:



Gambar 2 Diagram alir penelitian

Dalam mengevaluasi tingkat degradasi minyak transformator selama masa operasi tertentu, analisis tidak cukup hanya bergantung pada pembacaan nilai akhir dari alat uji laboratorium. Diperlukan sebuah perhitungan analisis tren persentase laju perubahan untuk mengidentifikasi seberapa buruk penurunan kualitas isolasi. Persentase laju perubahan suatu parameter pengujian dari tahun ke tahun dapat dihitung secara matematis menggunakan persamaan 1 sebagai berikut [8]:

$$\text{Laju Perubahan} = \frac{\text{Nilai Akhir} - \text{Nilai Awal}}{\text{Nilai Awal}} \times 100\% \quad (1)$$

Untuk membuktikan hubungan antara parameter *interfacial tension* dan total acid number berdasarkan data hasil pengujian dan analisis statistik, digunakan metode korelasi pearson menggunakan rumus persamaan 2 sebagai berikut [9]:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (2)$$

Oil quality index yang sering dikenal indeks *Myers* adalah sebuah metode diagnosis komprehensif yang dikembangkan untuk menilai kelayakan dan sisa masa pakai minyak isolasi cair. Rumus persamaan *oil quality index* dijabarkan sebagai berikut [10]:

$$\text{OQI} = \frac{\text{IFT}}{\text{TAN}} \quad (3)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Degradasi Minyak Isolasi

Tabel 1 menyajikan data historis hasil pengujian karakteristik minyak isolasi pada Transformator Unit 1 selama periode Februari 2022 hingga Februari 2025 yang dievaluasi berdasarkan standar kelayakan IEC 60422:2013.

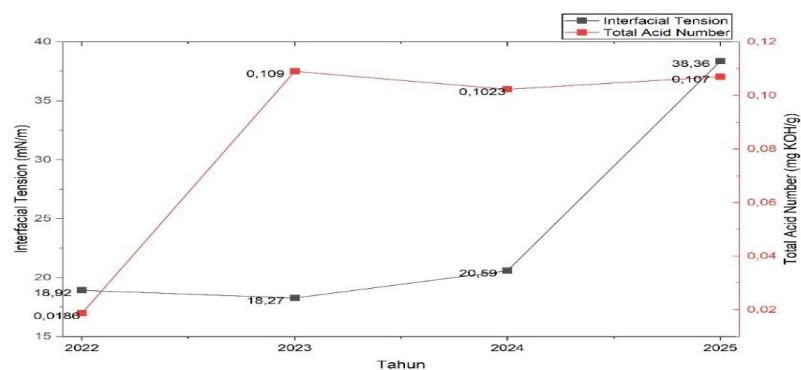
Tabel 1 Tabel Hasil Degradasi Minyak Isolasi

Parameter	Hasil Pengujian Sampel Minyak Karakteristik unit 1						
	Februari 2022	Februari 2023	Februari 2024	Februari 2025	Standar IEC 60422 : 2013		
Tegangan	100.2	60,3	86,4	100,1	>50	40-50	<40
Tembus	kV/2.5mm	kV/2,5mm	kV/2,5mm	kV2.5mm			
Kadar Air	15.175 ppm	30.1 ppm	39.95 ppm	27.35 ppm	<20	20-30	>30
Warna	6.1	6	5.9	5.9	<3.5		>3.5
Bilangan	0.0186 mg	0.109 mg	0.1023 mg	0.107 mg	<0.1	0.2	>0.2
Asam	KOH/g	KOH/g	KOH/g	KOH/g			
Tegangan	18.92	18.27	20.59	38.36	>28	22-28	<22
Antar	mN/m	mN/m	mN/m	mN/m			
Muka							
Terakreditasi KAN (Komite Akreditasi Nasional)					Baik	Cukup	Buruk

Berdasarkan data tersebut, terjadi dinamika fluktuasi kualitas minyak; di mana parameter Tegangan Antarmuka tertahan pada kategori Buruk (<22 mN/m) pada periode 2022–2024 sebelum akhirnya mengalami pemulihan signifikan ke kategori Baik pada tahun 2025. Di sisi lain, Bilangan Asam menunjukkan tren peningkatan degradasi dari kategori Baik pada 2022 menjadi kategori Cukup secara konstan pada rentang 2023–2025. Kondisi fluktuatif ini menjadi indikator empiris adanya akumulasi produk oksidasi polar di dalam transformator.

Grafik Perubahan Interfacial Tension dan Total Acid Number

Untuk mempermudah analisis terhadap perubahan kualitas minyak transformator, data hasil pengujian *Interfacial Tension* dan *Total Acid Number* disajikan dalam bentuk grafik terhadap waktu pengamatan. Penyajian dalam bentuk grafik bertujuan untuk memberikan gambaran visual mengenai kecenderungan perubahan kedua parameter tersebut selama periode pengamatan.



Gambar 2 Grafik Perubahan IFT dan TAN

Data Perhitungan Laju Perubahan Interfacial Tension

Berdasarkan hasil tabel pengujian 2, nilai interfacial tension pada awal periode pengamatan berada pada kategori rendah dan mengalami peningkatan pada periode berikutnya. Peningkatan paling signifikan terjadi pada tahun 2025. Dibawah ini telah disajikan hasil analisis tren tegangan antar muka sebagai berikut

Tabel 2 Laju Perubahan IFT

Periode Tahun	IFT Awal	IFT Akhir	Laju Perubahan
2022-2023	18,92 mN/m	18.27 mN/m	-3.44%
2023-2024	18.27 mN/m	20.59 mN/m	+12.70%
2024-2025	20.59 mN/m	38.36 mN/m	+86.3%

Perhitungan laju perubahan dilakukan menggunakan persamaan 1 sebagai berikut :

$$\text{Laju Perubahan} = \frac{18,27 - 18,92}{18,92} \times 100\%$$

$$= -3,44\%$$

$$\text{Laju Perubahan} = \frac{20,59 - 18,27}{18,27} \times 100\%$$

$$= 12,70\%$$

$$\text{Laju Perubahan} = \frac{38,36 - 20,59}{20,59} \times 100\%$$

$$= 86,30\%$$

Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa selama periode 2022 hingga 2024 minyak transformator menunjukkan indikasi degradasi yang ditandai dengan rendahnya nilai interfacial tension. Namun setelah dilakukan pengantian minyak pada tahun 2025, kualitas minyak mengalami perbaikan yang ditunjukkan oleh peningkatan nilai interfacial tension secara signifikan.

Data Perhitungan Laju Perubahan Total Acid Number

Nilai *Total Acid Number* menunjukkan jumlah senyawa asam yang terbentuk akibat proses oksidasi minyak selama masa operasi transformator. Berdasarkan tabel 3 hasil pengujian selama periode 2022 hingga 2025, nilai *Total Acid Number* menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada awal periode pengamatan, kemudian cenderung stabil pada periode berikutnya. Peningkatan paling besar terjadi pada periode 2022 hingga 2023, yaitu dari 0.0186 mg KOH/g menjadi 0.1090 mg KOH/g.

Tabel 3 Laju Perubahan TAN

Periode Tahun	TAN awal	TAN Akhir	Laju Perubahan
2022-2023	0.0186 mg KOH/g	0.1090 mg KOH/g	486,02%
2023-2024	0.1090 mg KOH/g	0.1023 mg KOH/g	-6.15%
2024-2025	0.1023 mg KOH/g	0.1070 mg KOH/g	4.59

Perhitungan laju perubahan dilakukan menggunakan persamaan 2 sebagai berikut :

$$\text{Laju Perubahan} = \frac{0,1090 - 0,0186}{0,0186} \times 100\%$$

$$= 486,02\%$$

$$\text{Laju Perubahan} = \frac{0,1023 - 0,1090}{0,1090} \times 100\%$$

$$= -6,15\%$$

$$\text{Laju Perubahan} = \frac{0,1070 - 0,1023}{0,1023} \times 100\%$$

$$= 4,59\%$$

Secara keseluruhan, tren nilai total acid number selama periode pengamatan menunjukkan bahwa degradasi minyak transformator paling dominan terjadi pada periode 2022 hingga 2023, yang ditandai dengan peningkatan nilai total acid number yang sangat signifikan. Berdasarkan standar IEC 60422:2013, nilai total acid number pada tahun 2023 hingga 2025 berada pada kategori cukup, sehingga kondisi minyak masih layak digunakan, namun memerlukan pemantauan secara berkala untuk mencegah penurunan kualitas.

Data Perhitungan Korelasi Pearson

Analisis hubungan parameter Interfacial Tension dan Total Acid Number dilakukan untuk mengetahui keterkaitan antara perubahan sifat fisik dan degradasi kimia minyak transformator selama periode operasi. Hubungan antara kedua parameter dianalisis menggunakan metode Korelasi Pearson untuk mengetahui tingkat hubungan antara parameter Interfacial Tension dan Total Acid Number berdasarkan data hasil pengujian periode 2022 hingga 2025.

Tabel 4 Data Perhitungan Korelasi Pearson

Tahun	IFT (x)	TAN (y)	x ²	y ²	xy
2022	18,92	0,0186	357,966	0.000346	0,3519
2023	18,27	0,1090	333.793	0.011881	1,9914
2024	20,59	0,1023	423.948	0.010456	2.1064
2025	38,36	0,1070	1471.490	0.011449	4.1045
Σ	96,14	0,3369	2587.197	0.034141	8.5542

Koefesien korelasi pearson dihitung menggunakan persamaan 2 :

Dengan :

$$n = 4$$

$$\Sigma x = 96.14$$

$$\Sigma y = 0.3369$$

$$\Sigma x^2 = 2587.197$$

$$\Sigma y^2 = 0.034141$$

$$\Sigma xy = 8.5542$$

Maka perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$r = \frac{4(8.5542) - (96.14)(0.3369)}{\sqrt{[4(2587.197) - (96.14)^2][4(0.034141) - (0.3369)^2]}}$$

$$r = \frac{34.2168 - 32.3896}{\sqrt{[4(2587.197) - (96.14)^2][4(0.034141) - (0.3369)^2]}}$$

$$r = \frac{1.8272}{\sqrt{[4(2587.197) - (96.14)^2][4(0.034141) - (0.3369)^2]}}$$

$$r = \frac{1.8272}{\sqrt{(1105.8884)[4(0.034141) - (0.3369)^2]}}$$

$$r = \frac{1.8272}{\sqrt{(1105.8884)(0.02306239)}}$$

$$r = \frac{1.8272}{\sqrt{25.5029}}$$

$$r = \frac{1.8272}{5.050}$$

$$r = 0.362$$

Secara interpretasi statistik, nilai $r = 0,362$ mengindikasikan adanya hubungan linear positif yang berada pada kategori lemah antara parameter interfacial tension dan total acid number. Secara teoritis proses degradasi termal dan oksidasi alami minyak transformator akan menghasilkan asam karboksilat yang mengakibatkan total acid number meningkat secara stimulan menurunkan interfacial tension menurun, sehingga membentuk korelasi negatif yang kuat. Namun dinamika data pada studi ini mendiagnosa fenomena intervensi pemeliharaan pada tahun 2025. Tindakan berupa penggantian minyak (*oil replacement*) berhasil memperbaiki nilai fisik interfacial tension secara masif hingga mencapai 38,36 mN/m. Di sisi lain, karakteristik kimia total acid number tidak mengalami penurunan secara linear akibat adanya fenomena perembesan sisa asam atau acid leaching yang tertinggal di dalam pori-pori isolasi padat kertas selulosa ke fasa cair minyak baru.

Fenomena ini selaras dengan teori penuaan sistem isolasi kertas-minyak yang dikemukakan oleh [4] di mana senyawa asam hasil oksidasi memiliki afinitas yang jauh lebih tinggi terhadap molekul selulosa polar pada kertas dibandingkan terhadap minyak hidrokarbon fasa cair. Ketika penggantian minyak dilakukan tanpa adanya perbaikan atau pembersihan pada isolasi padat, sisa asam yang terperangkap dalam pori kertas akan berdifusi kembali (*leaching*) ke fasa cair minyak baru demi mencapai kesetimbangan dinamis kimiawi. Studi sejenis oleh [5] juga memberikan bukti empiris serupa bahwa pemurnian ataupun penggantian minyak fasa cair saja tidak akan pernah cukup untuk menuntaskan retensi asam yang sudah melekat kuat pada kertas isolasi, sehingga nilai TAN pasca intervensi akan tetap menunjukkan angka yang tinggi.

Penilaian Kondisi Minyak Dengan Metode Oil Quality Index

Metode ini mengintegrasikan parameter interfacial tension dan total acid number ke dalam satu nilai indeks numerik komposit. Pendekatan ini sangat efektif untuk mengidentifikasi kecenderungan endapan lumpur (*sludge*) di dalam transformator. Klasifikasi kondisi minyak isolasi berdasarkan nilai OQI mengacu pada standar klasifikasi Myers.

Rekapitulasi hasil perhitungan indeks kualitas minyak sepanjang periode pengamatan disajikan pada tabel 5 berikut :

Tabel 5 Data Perhitungan Oil Quality Index 2022 – 2025

Tahun	IFT	TAN	Hasil OQI	Kategori Kelayakan Myers
2022	18,92	0,0186	1017,20	Mutu Menengah
2023	18,27	0,1090	167,61	Buruk
2024	20,59	0,1023	201,27	Buruk
2025	38,36	0,1070	358,50	Mutu Menengah

Perhitungan matematis standar menggunakan rumus persamaan 6 sebagai berikut :

$$OQI_{2022} = \frac{18,92}{0,0186} = 1017,20$$

$$OQI_{2023} = \frac{18,27}{0,1090} = 167,61$$

$$OQI_{2024} = \frac{20,59}{0,1023} = 201,27$$

$$OQI_{2025} = \frac{38,36}{0,1070} = 358,50$$

Berdasarkan hasil komputasi pada tabel 6 terlihat dinamika penurunan dan pemulihan mutu isolasi cair yang selaras dengan riwayat operasi transformator. pada tahun 2022, nilai OQI berada pada nilai 1017,20 yang menempatkan pada kategori mutu menengah. Meskipun nilai total acid number pada tahun ini sangat bagus yaitu 0,0186 mg KOH, penurunan drastis pada parameter interfacial tension menjadi faktor penentu yang menekan nilai indeks.

Deteriorasi paling buruk terjadi pada tahun 2023 dan 2024, di mana nilai OQI mengalami penurunan drastis masing masing ke angka 167,61 dan 201,27. Nilai indeks yang berada jauh di bawah ambang batas kritis yakni < 300 ini mengonfirmasi bahwa minyak transformator telah memasuki fase buruk (*sludging*).

Pada tahun 2025, intervensi pemeliharaan berupa penggantian minyak oil replacement berhasil menaikkan kembali nilai OQI ke 358,50, sehingga status kelayakannya meningkat Kembali ke kategori mutu menengah. Pemulihan nilai OQI ini di dorong secara dominan oleh perbaikan struktur fisik minyak baru yang menaikkan nilai interfacial tension secara signifikan menjadi 38,36 mN/m.

Penurunan tajam nilai OQI di bawah ambang batas 300 pada tahun 2023–2024 ini memvalidasi klasifikasi indeks Myers yang dikembangkan oleh [10], di mana nilai OQI < 300 menjadi indikator absolut bahwa produk oksidasi terlarut telah melampaui batas kelarutannya di dalam minyak dan mulai mengendap membentuk lumpur aktif (*sludge*). Kondisi pembentukan lumpur ini dipertegas oleh penelitian [7] yang menyatakan bahwa kombinasi nilai IFT yang rendah dan bilangan asam yang tinggi merupakan pemicu utama kegagalan termal akibat penurunan laju konveksi pendinginan yang tertutup oleh endapan lumpur.

Implifikasi Strategi Pemeliharaan Condition Based Maintenance

Analisis komprehensif terhadap parameter Oil Quality Index (OQI) yang menunjukkan fase kritis pembentukan lumpur (*sludging phase* dengan nilai OQI < 300) pada periode 2023–2024, dikombinasikan dengan pembuktian empiris fenomena acid leaching pasca penggantian minyak pada tahun 2025, menegaskan adanya keterbatasan struktural pada metode pemeliharaan konvensional. Tindakan kuratif berupa penggantian minyak fasa cair (*oil replacement*) terbukti hanya mampu meregenerasi karakteristik fisik dielektrik eksternal minyak (seperti *interfacial tension*) tanpa menyelesaikan akar permasalahan kontaminasi kimiawi yang bersumber dari degradasi isolasi padat kertas selulosa. Sisa senyawa asam karboksilat berantai pendek yang terperangkap di dalam matriks serat selulosa mengalami proses difusi balik ke dalam fasa minyak baru guna mencapai kesetimbangan partisi kimiawi. Akibatnya, nilai *Total Acid Number* (TAN) minyak baru tetap tertahan pada level yang tinggi (0,1070 mg KOH/g), yang secara teoritis berpotensi memicu percepatan laju penuaan dini kembali.

Kondisi ini memberikan justifikasi ilmiah yang kuat untuk mengalihkan paradigma pemeliharaan dari Pemeliharaan Berbasis Waktu (*Time-Based Maintenance* - TBM) yang bersifat periodik-korektif menuju Pemeliharaan Berbasis Kondisi (*Condition-Based Maintenance* - CBM) yang bersifat prediktif-preventif. Pendekatan TBM yang selama ini diterapkan mengasumsikan laju degradasi berjalan secara linear terhadap waktu. Berdasarkan integrasi diagnosis OQI, korelasi kualitatif IFT-TAN, dan identifikasi fenomena *acid leaching* tersebut, dirumuskan tiga pilar strategi CBM yang direkomendasikan bagi keandalan sistem isolasi pada Transformator Unit 1:

1. Optimalisasi Pengendalian Asam melalui Reklamasi Minyak *Fuller's Earth*.
2. Restrukturisasi Frekuensi Monitoring Berdasarkan Indeks Kerusakan.
3. Validasi Kerusakan Isolasi Padat Melalui Analisis Senyawa Furan.

4. KESIMPULAN

Analisis komprehensif terhadap karakteristik penuaan sistem isolasi komposit pada Transformator Unit 1 menunjukkan bahwa sebelum pemeliharaan dilakukan, minyak isolasi telah mengalami deteriorasi parah hingga memasuki fase kritis pembentukan lumpur aktif (*sludging phase*) yang berisiko menyumbang

saluran konveksi pendingin dan memicu kerusakan termal. Intervensi kuratif berupa penggantian minyak konvensional (*oil replacement*) terbukti memiliki keterbatasan struktural karena hanya mampu meregenerasi karakteristik fisik-tensioaktif luar pada fasa cair tanpa menyelesaikan akar kontaminasi pada fasa padat. Fenomena ini terbukti secara empiris melalui adanya *acid leaching* pasca-pemeliharaan, di mana sisa senyawa asam karboksilat polar yang terperangkap dalam pori-pori kertas isolasi selulosa berdifusi kembali ke fasa minyak baru untuk mencapai kesetimbangan partisi kimiawi. Akibatnya, terjadi dekopling parameter di mana pulihnya nilai tegangan antarmuka (sifat fisik) tidak serta-merta mencerminkan hilangnya kontaminan asam (sifat kimia) di dalam sistem isolasi secara keseluruhan. Temuan anomali ini memberikan justifikasi ilmiah yang kuat mengenai ketidakefektifan strategi pemeliharaan berbasis waktu (*Time-Based Maintenance*). Guna mengantisipasi percepatan penuaan kertas akibat paparan sisa asam yang belum tuntas, direkomendasikan transisi segera menuju strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance*). Strategi ini diimplementasikan melalui penerapan metode reklamasi sirkulasi menggunakan media adsorpsi *fuller's earth* untuk menarik residu asam dari kertas isolasi, peningkatan frekuensi monitoring parameter secara adaptif, serta pelaksanaan pengujian senyawa furan untuk memvalidasi sisa kekuatan mekanis dan tingkat kerapuhan isolasi padat demi menjamin keandalan jangka panjang transformator.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PLN ULTG Cawang atas izin dan fasilitas yang diberikan selama proses pengambilan data untuk penelitian ini di Gardu Induk Cawang Lama 150/20kV

REFERENSI

- [1] M. Saputra, "Analisis Minyak Isolasi Transformator Berdasarkan Pengujian DGA (Dissolved Gas Analysis) Pada Transformator Daya PT.PLN Nusantara Power PLTGU Muara Tawar Bekasi," vol. 07, no. 2, pp. 1–52, 2025.
- [2] C. Widyastuti and R. A. Wisnuaji, "Analisis Tegangan Tembus Minyak Transformator Di PT. PLN (Persero) Bogor," *Elektron J. Ilm.*, vol. 11, no. 2, pp. 75–78, 2021, doi: 10.30630/eji.11.2.128.
- [3] I. Muttahin and A. Syakur, "ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN DAN USIA PAKAI TERHADAP KARAKTERISTIK DAN ESTIMASI LIFETIME MINYAK ISOLASI TRANSFORMATOR Ilham," vol. 4, p. 8.
- [4] R. Duanaputri *et al.*, "Pengembangan Uji Eksperimental Penuaan Dipercepat Sistem Isolasi Kertas Terendam Minyak Transformator," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 3, pp. 142–145, 2023, doi: 10.33795/elposys.v10i3.3070.
- [5] M. A. A. Putra, S. Member, and R. A. Prasajo, "Assessing Transformer Aging Using Dielectric Oil Characteristics : Influence of Operating Voltage Levels and Purification," *IEEE Access*, vol. 13, no. April, pp. 63186–63202, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3558408.
- [6] SPLN, "Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga," *Pt. Pln*, vol. 1, pp. 1–142, 2014.
- [7] D. Silalahi, D. H. Darmawan, and R. P. Pertiwi, "Interfacial Tension and Total Acid Number Correlation in Natural Ester Transformer Oils," *2025 Int. Conf. Technol. Policy Energy Electr. Power*, pp. 61–66, 2025, doi: 10.1109/ict-pep67281.2025.11232388.
- [8] E. H. Arya and S. K. Anggraeni, "Analisa Minyak Transformator Daya 60 MVA Menggunakan Pengujian Dissolve Gas Analysis," vol. 10, no. 1, pp. 19–29, 2025, [Online]. Available: Ermawati1%0A, Yolnasdi2%0A, Hanifulkhair3%0A, Engla Harda Arya4%0A, Sely Kusuma Anggraeni5
- [9] P. Wati, Rahma, A. Of, O. I. L. Testing, and C. B. Elevator, "PEARSON CORRELATION ANALYSIS OF OIL TESTING PARAMETERS ON REMAINING USEFUL LIFE (RUL) IN GEARBOX," vol. 5, pp. 445–455, 2026.
- [10] V. N. Wijayaningrum, "ENHANCING POWER TRANSFORMER OIL QUALITY," vol. 8, no. 1, pp. 34–43, 2024, doi: <https://doi.org/10.31961/eltikom.v8i1.1052>.