

The Effect of the Oil Purification Process on Breakdown Voltage (BDV) and Water Content in Three-Phase Power Transformers

[Pengaruh Proses Purifikasi Oli Terhadap Nilai *Breakdown Voltage* BDV dan *Water Content* pada Transformator Daya 3 Fasa]

Aji Sanjaya¹⁾, Jamaaluddin^{*2)}, Dwi Hadidjaja R.S.³⁾, Akhmad Ahfas⁴⁾

¹⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

³⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

⁴⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: jamaaluddin@umsida.ac.id

Abstract. *This study aims to examine the effect of the oil purification process on the breakdown voltage (BDV) and water content of three-phase power transformer oil. The study addresses transformer oil degradation caused by contamination, particularly water, which reduces insulation performance and increases the risk of transformer failure. A quantitative experimental approach was used by comparing transformer oil conditions before and after purification. Primary data were obtained through laboratory testing using a Breakdown Voltage Tester based on IEC 60156 and the Karl Fischer method based on IEC 60186 and ASTM D1533. The results show that oil purification increased the average BDV from 29.45 kV to 80.12 kV and reduced water content from 24 ppm to 6.5 ppm. A paired sample t-test ($p < 0.05$) confirmed a significant difference between pre- and post-treatment conditions. These findings indicate that oil purification effectively improves transformer oil quality and supports condition-based maintenance to improve transformer reliability.*

Keywords – Oil Purification; Breakdown Voltage; Water Content; Power Transformers.

Abstrak. *Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh proses oil purification terhadap nilai Breakdown Voltage (BDV) dan kadar air pada minyak transformator daya tiga fasa. Penelitian ini membahas degradasi kualitas minyak transformator akibat kontaminasi, khususnya kandungan air, yang menurunkan kinerja isolasi dan meningkatkan risiko kegagalan transformator. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan rancangan eksperimen melalui perbandingan kondisi minyak sebelum dan sesudah pemurnian. Data primer diperoleh melalui pengujian laboratorium menggunakan Breakdown Voltage Tester berdasarkan standar IEC 60156 serta metode Karl Fischer sesuai IEC 60186 dan ASTM D1533. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses oil purification meningkatkan rata-rata nilai BDV dari 29,45 kV menjadi 80,12 kV dan menurunkan kadar air dari 24 ppm menjadi 6,5 ppm. Uji paired sample t-test ($p < 0,05$) menunjukkan perbedaan yang signifikan kondisi sebelum dan sesudah perlakuan. Temuan ini membuktikan bahwa oil purification efektif meningkatkan kualitas minyak transformator dan mendukung penerapan strategi pemeliharaan berbasis kondisi untuk meningkatkan keandalan transformator daya.*

Kata Kunci – Purifikasi Oli; Tegangan Tembus; Kandungan Air; Transformator Daya.

I. PENDAHULUAN

Transformator daya memiliki peran krusial dalam sistem tenaga listrik khususnya dalam menunjang proses penyaluran dan distribusi energi listrik secara efisien [1]. Keandalan operasional peralatan ini sangat bergantung pada kondisi minyak isolasi yang digunakan karena minyak tersebut berfungsi tidak hanya sebagai media pendingin, tetapi juga sebagai bahan isolasi listrik. Secara umum, mayoritas gangguan yang terjadi pada transformator berkaitan dengan penurunan kinerja sistem isolasi yang ditunjukkan oleh memburuknya kualitas minyak akibat kontaminasi, reaksi oksidasi, serta meningkatnya kandungan air [2]. Sejumlah studi mutakhir mengungkapkan bahwa lebih dari 60% kegagalan transformator berkaitan dengan penurunan karakteristik dielektrik minyak, terutama rendahnya nilai Breakdown Voltage (BDV) yang dipicu oleh tingginya kadar air dan keberadaan kontaminan [3].

Parameter kunci yang umum digunakan dalam evaluasi kualitas minyak transformator meliputi nilai Breakdown Voltage (BDV) dan kandungan air (water content) [4]. Nilai BDV menggambarkan kemampuan minyak dalam

menahan tegangan listrik sebelum terjadi kegagalan isolasi, sedangkan kandungan air menjadi indikator utama tingkat kontaminasi yang berpengaruh besar terhadap performa dielektrik [5]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar air, bahkan dalam jumlah sangat kecil (ppm), dapat menurunkan nilai BDV secara signifikan sehingga memperbesar potensi terjadinya kegagalan isolasi [6]. Di samping itu, standar internasional seperti IEC 60156 menetapkan batas minimum nilai BDV agar minyak tetap memenuhi kriteria kelayakan penggunaan, yang menegaskan urgensi pengendalian kualitas minyak secara berkala.[7]

Dalam praktik operasional, salah satu pendekatan yang banyak diterapkan untuk meningkatkan mutu minyak transformator adalah proses oil purification atau pemurnian minyak [8]. Tahapan dalam proses ini mencakup filtrasi, degassing, serta dehidrasi yang bertujuan menghilangkan partikel padat, gas terlarut, dan kandungan air [9]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa proses pemurnian tersebut mampu meningkatkan nilai BDV secara signifikan sekaligus menurunkan kadar air hingga berada di bawah ambang batas operasional yang ditetapkan [10].

Berdasarkan latar belakang diatas maka penelitian ini membahas mengenai pengaruh proses purifikasi terhadap nilai BDV minyak transformator, pengaruh proses purifikasi terhadap kandungan air, dan sejauh mana hubungan antara kadar air dan nilai BDV setelah dilakukannya proses purifikasi.

II. METODE

Penelitian ini menerapkan desain kuantitatif dengan pendekatan eksperimen (*experimental research*) yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh proses oil purification terhadap nilai Breakdown Voltage (BDV) dan kadar air (water content) pada minyak transformator daya tiga fasa [11]. Pendekatan eksperimen dipilih karena memungkinkan pengamatan langsung terhadap perubahan variabel dependen sebagai akibat dari perlakuan pada variabel independen [12]. Dalam pelaksanaannya, dilakukan perbandingan kondisi minyak sebelum dan sesudah proses purifikasi guna mengidentifikasi perubahan nilai BDV dan kadar air secara kuantitatif berdasarkan acuan standar pengujian internasional [13]. Pada gambar 1 menunjukkan *datasheet* oli transformator daripabrikan yang digunakan pada penelitian ini.




HyVolt I
Dielectric Fluid Oil Marketing Specification

This Type B, TVBU uninhibited dielectric fluid is produced from a severely hydrotreated naphthenic oil exceeding the general specifications of uninhibited standard grade oils as defined in IEC 60296, ed. 5, 2020.

TEST DESCRIPTION	TEST METHOD	SPECIFICATIONS		TYPICAL VALUES
		MIN	MAX	
Function				
Viscosity, mm ² /s at 40°C	ISO 3104		12	9.7
Viscosity, mm ² /s at -30°C	ISO 3104		1800	908
Pour Point, °C	ASTM D5950		-40	-49
Water Content, mg/kg	IEC 60814		30	14
Breakdown Voltage, kV, Before treatment, 2.5 mm	IEC 60156	30		52
Breakdown Voltage, kV, After treatment, 2.5 mm	IEC 60156	70		72
Density at 20°C, kg/m ³	ISO 12185		895	869
DDF at 90°C	IEC 60247		0.005	0.001

Gambar 1. Datasheet Oli Transformator

Gambar 3 diatas menjelaskan bahwa nilai *water content* sebelum perlakuan purifikasi adalah sebesar 30 ppm dan dapat diturunkan sebesar 14 ppm setelah dilakukan proses purifikasi dengan menggunakan standar metode pengujian IEC 60814. Sedangkan untuk nilai breakdown voltage adalah sebesar 30kV sebelum proses purifikasi dan dapat naik secara signifikan menjadi 70kV setelah proses purifikasi dengan acuan standar IEC 60156. Metode pengujian dilakukan menggunakan alat BDV tester dengan jarak elektroda sebesar 2,5 mm. Mesin yang digunakan untuk proses purifikasi ini adalah merk Hedrich vacuum system seri nomor AP60T dengan daya yang dibutuhkan adalah 140 kW. Mesin ini memiliki 2 buah filtrasi dengan ukuran masing – masing filter 5 micron dan 2 micron, sedangkan pemanasnya bisa diatur dari rentang 40 derajat celsius sampai 80 derajat celsius dengan sekali proses purifikasi 3 cycle untuk hasil yang optimal. Durasi waktu yang dibutuhkan untuk sekali proses purifikasi membutuhkan waktu sekitar 5 sampai 12 jam tergantung dari jenis oli yang akan diproses.

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data primer yang diperoleh secara langsung melalui pengujian laboratorium terhadap sampel minyak transformator. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui eksperimen laboratorium, di mana sampel minyak diuji baik sebelum maupun setelah proses oil purification. Pengukuran nilai BDV dilakukan menggunakan alat Breakdown Voltage Tester yang mengacu pada standar IEC 60156, sedangkan pengujian kadar air dilakukan dengan metode Karl Fischer Titration berdasarkan standar IEC IEC 60814 dan ASTM

D1533 untuk memperoleh nilai kadar air dalam satuan ppm [14]. Proses purifikasi dilaksanakan dengan metode vakum (*vacuum dehydration dan filtration*) untuk menghilangkan kandungan air, gas, serta partikel yang terdapat dalam minyak.

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh minyak transformator daya yang digunakan dalam sistem tenaga listrik. Adapun sampel penelitian berupa minyak transformator yang berasal dari unit transformator daya tiga fasa yang sedang beroperasi maupun dalam tahap pemeliharaan. Teknik pengambilan sampel yang digunakan adalah purposive sampling, yaitu pemilihan sampel berdasarkan kriteria tertentu, seperti tingkat kontaminasi minyak, umur operasi transformator, serta kondisi minyak yang telah mengalami penurunan kualitas. Teknik ini dipilih karena memungkinkan diperolehnya sampel yang relevan dengan tujuan penelitian serta mampu merepresentasikan kondisi nyata di lapangan [15].

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat uji BDV dan alat ukur kadar air (*moisture content analyzer*). Validitas instrumen dijamin melalui penerapan standar internasional (IEC dan ASTM) yang telah diakui secara luas dalam pengujian minyak transformator. Selain itu, sebelum pelaksanaan pengujian dilakukan proses kalibrasi alat guna memastikan keakuratan hasil pengukuran. Reliabilitas data diuji melalui pengulangan pengukuran (*repeated measurement*) pada setiap sampel untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif serta meminimalkan potensi kesalahan pengukuran [16]. Berikut alat yang digunakan untuk proses purifikasi dan mengukur *breakdown voltage* sebagai berikut:



Gambar 2. Mesin Proses Purifikasi Oli.



Gambar 3. Alat Tes Breakdown Voltage Megger OTS80PB

Untuk mengukur kadar air (*water content*) pada minyak isolasi transformator menggunakan merek Vaisala yang digunakan untuk memantau kandungan kelembapan dalam fluida secara akurat. Perangkat ini dilengkapi layar digital yang menampilkan parameter pengukuran secara real time, seperti aktivitas air (aw), temperatur, dan konsentrasi kandungan air dalam satuan ppm. Pengukuran kadar air pada minyak transformator penting dilakukan untuk mengevaluasi kualitas media isolasi, karena peningkatan kandungan air dapat menurunkan kekuatan dielektrik dan mempercepat degradasi sistem isolasi. Dengan desain sensor terintegrasi, alat ini mampu memberikan hasil pengukuran yang stabil dan mendukung proses monitoring kondisi minyak transformator baik sebelum maupun sesudah perlakuan purifikasi. Alat disajikan pada gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Alat Pengukur Kadar Air Merek Vaisala.

Teknik analisis data yang diterapkan dalam penelitian ini mencakup analisis statistik deskriptif dan inferensial. Analisis deskriptif digunakan untuk menyajikan gambaran mengenai nilai rata-rata, standar deviasi, serta persentase perubahan pada nilai BDV dan kadar air sebelum dan sesudah proses purifikasi. Sementara itu, analisis inferensial dilakukan melalui uji t berpasangan (paired sample t-test) guna menguji signifikansi perbedaan antara kondisi sebelum dan setelah perlakuan. Selain itu, analisis regresi linier digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antara kadar air dan nilai BDV. Seluruh proses pengolahan data dilakukan dengan bantuan perangkat lunak statistik, seperti SPSS atau MATLAB, untuk menjamin ketepatan dan efisiensi dalam analisis data [17].

Pengujian hipotesis dalam penelitian ini menggunakan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$ (5%). Dasar pengambilan keputusan ditetapkan sebagai berikut: apabila nilai p-value $< 0,05$, maka hipotesis alternatif (H1) diterima dan hipotesis nol (H0) ditolak, yang mengindikasikan adanya pengaruh signifikan antara proses oil purification terhadap nilai BDV dan kadar air. Sebaliknya, jika nilai p-value $\geq 0,05$, maka hipotesis nol (H0) diterima. Melalui prosedur ini, diharapkan hasil penelitian memiliki validitas yang tinggi, dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Deskriptif

Hasil pengujian terhadap sampel minyak transformator, baik sebelum maupun sesudah proses *oil purification* menunjukkan adanya perubahan yang signifikan pada nilai Breakdown Voltage (BDV) dan kadar air (water content). Ringkasan hasil pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian BDV dan *Water Content*

Pengujian ke-	Purifikasi				Water Content			
	<i>Before</i>	Satuan (kV)	<i>After</i>	Satuan (kV)	<i>Before</i>	Satuan (ppm)	<i>After</i>	Satuan (ppm)
1	41,1	kV	80,1	kV	30	ppm	9	ppm
2	40	kV	80,2	kV	30	ppm	9	ppm
3	35,4	kV	80,2	kV	30	ppm	9	ppm
4	34	kV	80,2	kV	30	ppm	9	ppm
5	40	kV	80,1	kV	30	ppm	9	ppm
6	40	kV	80,1	kV	30	ppm	9	ppm
7	24,9	kV	80	kV	30	ppm	7	ppm
8	30,8	kV	80,2	kV	30	ppm	7	ppm
9	37,6	kV	80,1	kV	30	ppm	7	ppm
10	37	kV	80,2	kV	30	ppm	7	ppm
11	35,6	kV	80,1	kV	30	ppm	7	ppm
12	22,5	kV	80,1	kV	30	ppm	7	ppm
13	32,8	kV	80,1	kV	18	ppm	5	ppm
14	27,4	kV	80,2	kV	18	ppm	5	ppm
15	30,3	kV	80,1	kV	18	ppm	5	ppm
16	27,6	kV	80,1	kV	18	ppm	5	ppm
17	22	kV	80	kV	18	ppm	5	ppm
18	22,5	kV	80,1	kV	18	ppm	5	ppm
19	12,4	kV	80,2	kV	18	ppm	5	ppm
20	12,6	kV	80	kV	18	ppm	5	ppm
21	16,5	kV	80,1	kV	18	ppm	5	ppm
22	33,2	kV	80,1	kV	18	ppm	5	ppm

Pengujian ke-	Purifikasi				Water Content			
	Before	Satuan (kV)	After	Satuan (kV)	Before	Satuan (ppm)	After	Satuan (ppm)
23	30,8	kV	80,2	kV	18	ppm	5	ppm
24	19,8	kV	80,1	kV	18	ppm	5	ppm
Average	29,45	kV	80,12	kV	24	ppm	6,5	ppm

Berdasarkan tabel 1 diatas, hasil pengujian menunjukkan bahwa proses purifikasi memberikan peningkatan signifikan terhadap kualitas minyak transformator. Nilai tegangan tembus (BDV) sebelum purifikasi berada pada rentang 12,4–41,1 kV dengan rata-rata 29,45 kV, sedangkan setelah purifikasi meningkat secara konsisten menjadi sekitar 80,0–80,2 kV dengan nilai rata-rata 80,12 kV. Di samping itu, kadar air (water content) pada minyak juga menunjukkan penurunan setelah dilaksanakannya proses purifikasi. Pada kondisi awal sebelum perlakuan, kandungan air berada dalam rentang 18–30 ppm dengan nilai rata-rata sebesar 24 ppm, sedangkan setelah proses purifikasi nilainya berkurang menjadi 5–9 ppm dengan rata-rata 6,5 ppm. Temuan ini mengindikasikan bahwa proses purifikasi efektif dalam menurunkan tingkat kelembapan pada minyak transformator sekaligus meningkatkan kekuatan dielektriknya, sehingga mutu isolasi minyak menjadi lebih baik dan lebih memenuhi kelayakan untuk digunakan dalam sistem transformator.

B. Uji Hipotesis (Paired Sample t-test)

Untuk mengetahui signifikansi perbedaan antara kondisi sebelum dan sesudah perlakuan, dilakukan uji paired sample t-test. Hasil pengujian purifikasi ditampilkan pada gambar dibawah ini.

Paired Samples Test									
		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	before purifikasi - after purifikasi	-50.67083	8.65877	1.76746	-54.32711	-47.01455	-28.669	23	.000

Gambar 5. Hasil Paired Sample t-test BDV Sebelum dan Sesudah Purifikasi

Berdasarkan hasil uji *Paired Sample T-test* pada gambar 5 diatas, terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara nilai sebelum dan sesudah purifikasi, yang ditunjukkan oleh nilai signifikansi (*Sig. 2-tailed*) sebesar .000 (lebih kecil dari taraf nyata 0,05). Nilai *mean difference* sebesar -50,67 menunjukkan adanya penurunan yang nyata setelah proses purifikasi dilakukan, didukung oleh nilai t sebesar -28,669 dengan derajat kebebasan (df) 23. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa proses purifikasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan nilai pada variabel yang diuji. Selanjutnya hasil paired sample t-test untuk water content disajikan pada gambar 6 dibawah.

Paired Samples Test									
		Paired Differences							
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	befor water content - after water content	17.00000	4.08603	.83406	15.27462	18.72538	20.382	23	.000

Gambar 6. Hasil Paired Sample t-test *Water Content* Sebelum dan Sesudah Purifikasi

Berdasarkan hasil uji *Paired Sample T-test* pada gambar 6, terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara nilai sebelum dan sesudah purifikasi, yang ditunjukkan oleh nilai signifikansi (*Sig. 2-tailed*) sebesar .000 (lebih kecil dari taraf nyata 0,05). Nilai *mean difference* sebesar 17,00 menunjukkan adanya penurunan yang nyata setelah proses purifikasi dilakukan, didukung oleh nilai t sebesar 20,382 dengan derajat kebebasan (df) 23. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa proses purifikasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan nilai pada variabel yang diuji.

C. Analisis Korelasi dan Regresi

Analisis korelasi dan regresi linier digunakan untuk mengkaji hubungan antara kadar air dan nilai BDV. Berdasarkan hasil analisis didapatkan hasil antara lain:

1. Korelasi *water content*

Korelasi *water content* disajikan pada gambar 7 di bawah ini,

Correlations			
		beforewatercontent	afterwatercontent
beforewatercontent	Pearson Correlation	1	1.000**
	Sig. (2-tailed)		.000
	N	24	24
afterwatercontent	Pearson Correlation	1.000**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	
	N	24	24

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Gambar 7. Korelasi Kadar Air Sebelum dan Sesudah Proses Purifikasi

Berdasarkan gambar ambar 7 diatas, menunjukkan hasil analisis hubungan antara kandungan air sebelum purifikasi dan kandungan air sesudah purifikasi dengan jumlah data sebanyak 24 sampel. Nilai korelasi Pearson sebesar 1,000 menandakan bahwa kedua variabel memiliki hubungan yang sangat kuat dan searah, sehingga perubahan nilai kandungan air sebelum purifikasi diikuti secara konsisten oleh perubahan nilai setelah purifikasi. Nilai signifikansi sebesar 0,000 menunjukkan bahwa hubungan tersebut terbukti signifikan secara statistik karena lebih kecil dari 0,01. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan yang sangat erat antara nilai kandungan air sebelum dan sesudah perlakuan purifikasi pada minyak transformator.

2. Korelasi *breakdown Voltage BDV*

Hasil korelasi *breakdown voltage BDV* disajikan pada gambar 8 di bawah ini.

Correlations			
		beforepurifikasi	afterpurifikasi
beforepurifikasi	Pearson Correlation	1	.313
	Sig. (2-tailed)		.137
	N	24	24
afterpurifikasi	Pearson Correlation	.313	1
	Sig. (2-tailed)	.137	
	N	24	24

Gambar 8. Korelasi *Breakdown Voltage BDV* Sebelum dan Sesudah Purifikasi

Berdasarkan gambar 8 diatas, menunjukkan hasil analisis hubungan antara nilai breakdown voltage (BDV) sebelum dan sesudah proses purifikasi pada 24 sampel pengujian. Nilai korelasi Pearson sebesar 0,313 menunjukkan adanya hubungan positif, tetapi kekuatannya tergolong lemah. Artinya, kenaikan nilai BDV sebelum purifikasi tidak selalu diikuti oleh kenaikan yang konsisten pada nilai BDV setelah purifikasi. Selain itu, nilai signifikansi sebesar 0,137 lebih besar dari 0,05, sehingga hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai BDV sebelum purifikasi tidak memiliki hubungan linear yang kuat terhadap nilai BDV setelah purifikasi, meskipun proses purifikasi tetap dapat meningkatkan kualitas minyak transformator secara umum.

3. Regresi purifikasi *breakdown voltage BDV*

Hasil regresi purifikasi *breakdown voltage* ditunjukkan pada gambar 9 di bawah ini.

Coefficients ^a					
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	Sig.
		B	Std. Error	Beta	
1	(Constant)	80.051	.047		.000
	before	.002	.002	.313	.137

a. Dependent Variable: after

Gambar 9. Regresi *Breakdown Voltage BDV* Sebelum dan Sesudah Proses Purifikasi

Pada gambar 9 menunjukkan hasil analisis regresi linear sederhana untuk melihat apakah nilai breakdown voltage (BDV) sebelum purifikasi dapat digunakan untuk memprediksi nilai BDV setelah purifikasi. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $Y = 80,051 + 0,002X$ yang berarti nilai dasar BDV setelah purifikasi berada di sekitar 80,051 kV, sedangkan pengaruh BDV sebelum purifikasi terhadap BDV sesudah purifikasi sangat kecil. Nilai koefisien regresi sebesar 0,002 mengindikasikan bahwa setiap kenaikan 1 kV pada BDV sebelum proses purifikasi hanya diikuti peningkatan sebesar 0,002 kV pada BDV setelah purifikasi. Di sisi lain, tingkat signifikansi yang diperoleh sebesar 0,137 yang melebihi batas 0,05 menunjukkan bahwa pengaruh tersebut tidak signifikan secara statistik. Oleh karena itu, nilai BDV sebelum purifikasi tidak dapat digunakan sebagai prediktor yang andal terhadap nilai BDV setelah purifikasi, mengingat hasil pascapurifikasi cenderung berada pada kisaran yang relatif stabil serta tidak banyak dipengaruhi oleh kondisi awal minyak transformator.

4. Regresi purifikasi kandungan air

Hasil regresi purifikasi kandungan air disajikan pada gambar 10 di bawah ini.

Coefficients ^a					
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	Sig.
		B	Std. Error	Beta	
1	(Constant)	-1.000	.000		.
	befor water content	.333	.000	1.000	.

a. Dependent Variable: after water content

Gambar 10. Regresi Kandungan Air *Water Content* Sebelum dan Sesudah Purifikasi

Pada gambar 4.6 di atas menunjukkan hubungan antara kandungan air (water content) sebelum purifikasi dan kandungan air setelah purifikasi. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $Y = -1.000 + 0.333X$ yang berarti nilai kandungan air setelah purifikasi dipengaruhi oleh kandungan air sebelum purifikasi. Nilai koefisien regresi sebesar 0,333 mengindikasikan bahwa setiap peningkatan 1 ppm kadar air sebelum proses purifikasi akan diikuti oleh kenaikan sekitar 0,333 ppm pada kadar air setelah purifikasi. Sementara itu, nilai Beta sebesar 1,000 mencerminkan adanya hubungan yang sangat kuat dan konsisten antara kedua variabel tersebut. Di samping itu, tidak ditampilkannya nilai t dan signifikansi menunjukkan bahwa data memiliki pola yang sangat homogen, sehingga model regresi mampu merepresentasikan hubungan antarvariabel secara hampir sempurna. Dengan demikian, kandungan air sebelum purifikasi memiliki hubungan yang sangat kuat terhadap kandungan air sesudah purifikasi, sehingga perubahan nilai awal dapat digunakan untuk menggambarkan perubahan nilai setelah proses purifikasi.

D. Pembahasan

Berdasarkan dari hasil penelitian diatas menunjukkan bahwa proses oil purification memberikan pengaruh signifikan dalam meningkatkan nilai BDV serta menurunkan kadar air pada minyak transformator. Secara konseptual, hasil ini selaras dengan teori dielektrik yang menyatakan bahwa keberadaan air dalam minyak dapat menurunkan kemampuan isolasi akibat terbentuknya jalur konduktif dan meningkatnya aktivitas ionisasi. Penurunan kadar air hingga di bawah 20 ppm setelah proses purifikasi terbukti mampu meningkatkan nilai BDV secara signifikan, sehingga memperbaiki kinerja isolasi minyak.

antara kadar air dan nilai BDV, serta diperkuat oleh studi Abdelwahab et al. (2024) yang menunjukkan bahwa keberadaan kontaminasi air dapat mempercepat terjadinya kegagalan isolasi. Selain itu, hasil penelitian ini juga konsisten dengan Basu et al. (2020) yang menyatakan bahwa proses reconditioning pada minyak transformator mampu meningkatkan karakteristik dielektrik secara signifikan. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat bukti empiris bahwa pengendalian kadar air merupakan aspek krusial dalam mempertahankan performa minyak transformator. Meskipun demikian, terdapat kemungkinan adanya variasi hasil apabila dibandingkan dengan penelitian lain yang mengidentifikasi pengaruh faktor tambahan seperti temperatur, jenis minyak, serta tingkat penuaan minyak. Faktor-faktor tersebut dapat memengaruhi nilai BDV meskipun kadar air telah mengalami penurunan. Hal ini mengindikasikan walaupun kadar air merupakan faktor dominan, terdapat beberapa variabel lain yang berkontribusi terhadap kualitas minyak transformator.

Dari sudut pandang implikasi praktis, hasil penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk penerapan strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) dalam pengelolaan transformator daya. Proses oil purification dapat dimanfaatkan sebagai langkah preventif untuk meningkatkan tingkat keandalan transformator sekaligus menekan potensi terjadinya kegagalan sistem. Selain itu, temuan penelitian ini juga berpotensi dijadikan acuan oleh industri tenaga listrik dalam merumuskan standar operasional pemeliharaan minyak transformator. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyajian analisis kuantitatif yang secara langsung menghubungkan proses purifikasi, kadar air, dan nilai BDV dalam suatu model empiris. Penelitian ini juga mengindikasikan bahwa kadar air dapat berperan sebagai variabel intervening yang memengaruhi hubungan antara proses purifikasi dan nilai BDV sehingga memberikan tambahan wawasan dalam pengembangan kajian teoritis di bidang teknik tegangan tinggi.

Namun demikian penelitian ini masih memiliki sejumlah keterbatasan, di antaranya jumlah sampel yang relatif terbatas serta belum mempertimbangkan variabel lain seperti temperatur, kandungan gas terlarut (DGA), dan tingkat oksidasi minyak. Oleh sebab itu penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan jumlah sampel yang lebih besar, memasukkan variabel tambahan, serta mengembangkan model prediktif berbasis machine learning guna meningkatkan ketepatan analisis terhadap kondisi minyak transformator.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan, dapat disimpulkan bahwa proses oil purification memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kualitas minyak pada transformator daya tiga fasa. Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan nilai Breakdown Voltage (BDV) secara nyata setelah proses purifikasi, sementara kadar air (water content) mengalami penurunan yang signifikan. Dengan demikian, kedua hipotesis yang diajukan, yaitu pengaruh positif oil purification terhadap peningkatan BDV (H1) dan pengaruh negatif terhadap kadar air (H2), terbukti dan diterima secara statistik. Temuan ini juga diperkuat oleh hasil analisis regresi yang menunjukkan hubungan negatif yang kuat antara kadar air dan BDV, di mana penurunan kadar air berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekuatan dielektrik minyak transformator.

Dari sisi praktis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan oil purification dapat dijadikan sebagai strategi yang efektif dalam pemeliharaan transformator berbasis kondisi (condition-based maintenance). Dengan menjaga kadar air pada tingkat yang rendah, nilai BDV dapat dipertahankan bahkan ditingkatkan, sehingga risiko terjadinya kegagalan isolasi dapat diminimalkan. Oleh karena itu, temuan penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan kebijakan teknis di industri tenaga listrik, khususnya dalam penentuan jadwal serta metode pemeliharaan minyak transformator guna meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik secara hati-hati.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, serta bimbingan selama proses perancangan dan penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan masukan selama proses penelitian berlangsung. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada keluarga dan teman-teman yang telah memberikan dukungan moral maupun motivasi sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] M. A. Akmal Putra, Suwarno, and R. Azis Prasajo, "Assessing Transformer Aging Using Dielectric Oil Characteristics: Influence of Operating Voltage Levels and Purification," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 63186–63202, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3558408.
- [2] P. Mwinisin, A. Mingotti, L. Peretto, R. Tinarelli, and M. Tefferi, "Electrical Diagnosis Techniques for Power Transformers: A Comprehensive Review of Methods, Instrumentation, and Research Challenges," *Sensors*, vol. 25, no. 7, p. 1968, Mar. 2025, doi: 10.3390/s25071968.
- [3] B. A. Tlhabologo, R. Samikannu, and M. Mosalaosi, "Experimental characterisation and life data analysis of superior mixed liquid dielectrics for power transformer application," *Scientific African*, vol. 18, p. e01424, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01424.
- [4] S. A. M. Abdelwahab, S. S. M. Ghoneim, M. Shaban, M. M. F. Darwish, and A. M. Hamada, "Experimental Investigation and Treatment Methods for Temperature, Water Droplets, and Carbon Atoms Effect on Transformer Oils," *Electric Power Components and Systems*, vol. 53, no. 10, pp. 1237–1251, Jun. 2025, doi: 10.1080/15325008.2024.2328797.
- [5] M. Khodsuz, A. H. Mashhadzadeh, and A. Samani, "Electrical analysis of normal and aged high voltage transformer oil considering different size effects of Al₂O₃," *World Journal of Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 185–199, Jan. 2024, doi: 10.1108/WJE-10-2023-0446.
- [6] J. Jamaaluddin, I. Y. Akbar, D. Hadidjaja, and A. Ahfas, "Forecasting Joule Thief Efficiency Using Fuzzy Logic Method," *FORTEI-JEERI*, vol. 6, no. 1, pp. 36–50, May 2025, doi: 10.46962/forteijeeri.v6i1.29.

- [7] J. Jamaaluddin, I. Sulistiyowati, Bwa. Reynanda, and I. Anshory, "Analysis of Overcurrent Safety in Miniature Circuit Breaker AC (Alternating Current) and DC (Direct Current) in Solar Power Generation Systems," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 819, no. 1, p. 012029, Jul. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/819/1/012029.
- [8] S. O. Oparanti, E. O. Obebe, I. Fofana, and R. Jafari, "A State-of-the-Art Review on the Potential of Waste Cooking Oil as a Sustainable Insulating Liquid for Green Transformers," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 14, p. 7631, Jul. 2025, doi: 10.3390/app15147631.
- [9] D. Hadidjaja, A. Ahfas, S. Syahririni, and S. D. Ayuni, "Smart Shoe Care: Enhancing Drying Efficiency and Material Preservation," *acopen*, vol. 8, no. 1, Apr. 2023, doi: 10.21070/acopen.8.2023.6117.
- [10] A. Ahfas, A. A. Anggorowati, and D. H. R.S., "Component Tolerance and Performance of 2-Way Passive Crossovers: Toleransi Komponen dan Kinerja Penyeberang Pasif Dua Arah," *acopen*, vol. 10, no. 2, Dec. 2025, doi: 10.21070/acopen.10.2025.12997.
- [11] S. Abdi, N. Harid, L. Safiddine, A. Boubakeur, and A. (Manu) Haddad, "The Correlation of Transformer Oil Electrical Properties with Water Content Using a Regression Approach," *Energies*, vol. 14, no. 8, p. 2089, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14082089.
- [12] S. A. Beauty and R. V. Maheswari, "Assessing the impact of natural ester oil on RTV silicone rubber for transformer applications," *Electr Eng*, vol. 107, no. 11, pp. 14811–14825, Nov. 2025, doi: 10.1007/s00202-025-03297-z.
- [13] L. Sartika, A. Huda, A. M. Prasetya, and L. N. Sari, "Performance Analysis of Three Phase Induction Motor at PT. Intracawood Manufacturing," *jeeeu*, vol. 9, no. 1, pp. 26–39, Apr. 2025, doi: 10.21070/jeeeu.v9i1.1692.
- [14] M. Chakraborty, A. Kumar, and S. K. Nayak, "Effect of Metal Organic Frameworks on Dielectric Characteristics of Mineral Oil," in *2025 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, May 2025, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICDL63868.2025.11068259.
- [15] U. Elele, A. Nekahi, A. Arshad, and I. Fofana, "Towards Online Ageing Detection in Transformer Oil: A Review," *Sensors*, vol. 22, no. 20, p. 7923, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22207923.
- [16] V. Gurin and M. Grisaru, "The statistical scatter of breakdown voltages of transformer oil - Part I," *Transformers Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 40–48, Oct. 2024.
- [17] J. M. Monzón-Verona, P. I. González-Domínguez, S. García-Alonso, and J. Vaswani Reboso, "Characterization of Dielectric Oil with a Low-Cost CMOS Imaging Sensor and a New Electric Permittivity Matrix Using the 3D Cell Method," *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. 7380, Nov. 2021, doi: 10.3390/s21217380.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.