

TRANSFORMER HEALTH CONDITION ANALYSIS BASED ON HEALTH INDEX AND FAILURE METHOD

ANALISIS KONDISI KESEHATAN TRANSFORMATOR BERBASIS METODE INDEKS KESEHATAN DAN KEGAGALAN

Iswadi Hasyim Rosma^{1*}, Boy Ihsan², Jikro Pikri³

¹Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Indonesia
Email: iswadi.hr@lecturer.unri.ac.id

²Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Indonesia
Email: boy.ihsan@lecturer.unri.ac.id

³Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Indonesia
Email: jikro.pikri0248@student.unri.ac.id

Received: July 23, 2025 Revised: October 24, 2025 Published: October 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.24912/tesla.v27i2.35671>

Abstract

Transformers are one of the important assets whose health conditions need to be monitored to maintain operating reliability and prevent failures. Regular monitoring and testing can be done on transformer oil and insulating paper (furan). This article aims to evaluate the health index, estimate the remaining life and detect potential transformer failures. The test data used was obtained from two transformers at a biodiesel producing company in Indonesia, such as Dissolved Gas Analysis, Breakdown Voltage, Water Content, Acid, Interfacial Tension and 2 Fal (furan) tests. The method used in the diagnosis of transformer health conditions is the transformer health index method and analysis of potential failures based on the evaluation of Total Dissolved Combustible Gas, Roger's Ratio and Duval's Triangle. The results show that both transformers are in a healthy condition with a health index of 72% and 89%, which fall into the "Good" and "Very Good" categories, and the estimated operational life is more than 10 years and 15 years, respectively. However, the failure analysis results indicated an overheating failure with a temperature exceeding 700 °C. Although the overall transformer condition is still good, preventive maintenance measures are still recommended to avoid more serious damage in the future.

Keywords: Dissolved Gas Analysis; Duval Triangle; Roger's Ratio; Total Dissolved Combustible Gas; Transformer Health Index.

Abstrak

Transformator merupakan salah satu aset penting yang kondisi kesehatannya perlu dipantau untuk menjaga keandalan operasi dan mencegah kegagalan. Pemantauan dan pengujian secara berkala dapat dilakukan terhadap minyak transformator dan isolasi kertas (furan). Artikel ini bertujuan untuk mengevaluasi indeks kesehatan, estimasi sisa umur dan mendeteksi potensi kegagalan transformator. Data pengujian yang digunakan diperoleh dari dua transformator di sebuah perusahaan penghasil biodiesel di Indonesia yaitu data hasil pengujian *Dissolved Gas Analysis*, *Breakdown Voltage*, *Water Content*, *Acid*, *Interfacial Tension* serta 2 Fal (furan). Metode yang digunakan dalam diagnosis kondisi kesehatan transformator adalah metode indeks kesehatan transformator serta analisis potensi kegagalan berdasarkan evaluasi *Total Dissolved Combustible Gas*, *Roger's Ratio* dan *Duval's Triangle*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua transformator berada dalam kondisi sehat dengan indeks kesehatan 72% dan 89%, yang termasuk kategori "Baik" dan "Sangat Baik", serta estimasi umur operasional masing-masing lebih dari 10 tahun dan 15 tahun. Namun demikian, hasil analisis kegagalan mengindikasikan adanya kegagalan *overheating* dengan suhu melebihi 700 °C. Meskipun kondisi keseluruhan transformator masih baik, tindakan pemeliharaan preventif tetap direkomendasikan untuk menghindari kerusakan yang lebih serius dimasa mendatang.

Kata Kunci: *Dissolved Gas Analysis*; *Duval's Triangle*; Indeks Kesehatan Transformator; *Roger's Ratio*; *Total Dissolved Combustible Gas*.

PENDAHULUAN

Transformator merupakan salah satu aset penting dalam sistem kelistrikan yang berperan untuk mengubah tegangan dari satu level ke level yang lain pada jaringan transmisi dan distribusi tenaga listrik. Keandalan transformator sangat mempengaruhi kestabilan operasional seluruh infrastruktur kelistrikan. Dalam konteks industri, kegagalan transformator secara tiba-tiba dapat menimbulkan gangguan signifikan, termasuk interupsi operasional dan kerugian finansial yang besar. Oleh karena itu, evaluasi kondisi awal transformator menjadi aspek fundamental dalam perencanaan pemeliharaan preventif dan pengelolaan aset berbasis kondisi [1].

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk menilai kondisi transformator, salah satunya adalah indeks kesehatan transformator [2], [3], [4]. Pendekatan ini menggabungkan data dari berbagai parameter diagnostik, termasuk analisis gas terlarut (*Dissolved Gas Analysis*), evaluasi kualitas minyak isolasi seperti tegangan tembus (*breakdown voltage*), kadar air (*water content*), tingkat keasaman (*acid number*), tegangan antarmuka (*interfacial tension*) dan kadar *furan* (*2-furfuraldehyde/2FAL*) yang berfungsi untuk merepresentasi secara kuantitatif kondisi operasional transformator. Secara bersamaan, sejumlah metode diagnosis seperti *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG), *Roger's Ratio*, dan *Duval's Triangle* banyak digunakan untuk mendeteksi indikasi awal gangguan termal maupun elektrik dalam sistem isolasi [5], [6], [7]. Meskipun masing-masing metode memiliki efektivitas tersendiri, integrasi sistematis antar metode tersebut ke dalam satu kerangka kerja penilaian kesehatan belum banyak dilakukan dalam praktik industri.

Sejumlah studi terdahulu telah mengaplikasikan pendekatan indeks kesehatan atau metode diagnosis untuk memperkirakan kondisi transformator. Misalnya, Naderian et al. [2], Akhbar Candra M, et al. [8], serta Tamma et al. [4] berhasil menggunakan metode indeks kesehatan untuk mendiagnosis kondisi transformator dan memperoleh hasil analisis berupa prediksi umur operasi, jenis kemungkinan kegagalan, dan rekomendasi tindakan kedepannya. Selain itu, Siswanto et al. [9], melakukan analisis hasil DGA menggunakan beberapa metode. Dimana didapatkan hasil penelitian bahwa kandungan gas terlarut pada minyak transformator menunjukkan nilai yang normal pada Rasio Rogers dan TDCG. Sedangkan pada metode segitiga duvals, terdapat sedikit kerusakan pada asetilen (C_2H_2). Penelitian Surawijaya et al. [7] menganalisis kondisi empat transformator di dua pembangkit listrik panas bumi di Indonesia menggunakan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) selama enam tahun. Data dievaluasi dengan enam metode interpretasi DGA. Hasilnya menunjukkan adanya indikasi kegagalan termal dan sebagian gangguan listrik, dengan hasil diagnosis bervariasi antar metode, menekankan pentingnya kombinasi pendekatan untuk meningkatkan akurasi evaluasi kondisi transformator.

Berbagai penelitian sebelumnya telah berhasil menerapkan integrasi antara metode diagnosis berbasis DGA dan indeks kesehatan transformator untuk menilai kondisi transformator. Namun, hasil evaluasi dapat berbeda bergantung pada karakteristik operasi dan lingkungan tempat transformator beroperasi. Oleh karena itu, penerapan metode yang sama pada aset dengan karakteristik berbeda tetap penting untuk memperoleh gambaran kondisi aktual di lapangan. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini dilakukan pada transformator milik sebuah perusahaan penghasil biodiesel di Indonesia dengan tujuan mengevaluasi kondisi aktual transformator melalui integrasi semua parameter uji ke dalam indeks kesehatan berbasis standar [10], yaitu standar IEEE [11], [12], IEC [13], [14], dan CIGRE [15], sekaligus mengidentifikasi potensi kegagalan dengan memanfaatkan kombinasi dari tiga pendekatan diagnosis berbasis DGA.

METODOLOGI PENELITIAN

A. Indeks Kesehatan Transformator

Indeks kesehatan transformator adalah salah satu metode penilaian kuantitatif dan objektif yang mengintegrasikan hasil observasi operasi, inspeksi, serta pengujian di lapangan maupun laboratorium. Indeks ini memberikan penilaian pada kondisi transformator berdasarkan sejumlah parameter yang mencerminkan dampak akumulatif dari degradasi jangka panjang, yang pada akhirnya mempengaruhi usia operasional aset. Penilaian ini berguna untuk mengidentifikasi peralatan yang mendekati masa usia operasi atau memiliki potensi kegagalan tinggi, yang dapat menimbulkan kebutuhan penggantian peralatan dengan biaya yang besar. Hasil dari indeks kesehatan ini berbeda dari hasil uji pemeliharaan atau diagnosis berbasis kondisi, yang umumnya berfokus pada pendeteksian kerusakan atau ketidakefisienan [8].

Nilai indeks kesehatan transformator HI , dihitung dari setiap parameter berdasarkan batas standar internasional [2], [3] dengan menggunakan persamaan (1). Dimana n menunjukkan jumlah parameter yang digunakan, dan setiap parameter memiliki skor (S_i) dan faktor bobot (W_i).

$$HI = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Parameter-parameter yang digunakan merupakan hasil pengujian *Dissolved Gass Analysis* (DGA), minyak isolasi transformator dan isolasi kertas (*furan*) [8], dengan kriteria penilaian sebagaimana tercantum pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3. Penilaian setiap parameter menghasilkan skor numerik sesuai dengan deskripsi pada Tabel 4, yang selanjutnya diklasifikasikan ke dalam kategori A, B, C, D, dan E, dan dikonversi menjadi nilai Faktor Indeks Kesehatan HIF_j dengan skala penilaian 4, 3, 2, 1, dan 0, seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Nilai indeks akhir kesehatan HI_{FINAL} diperoleh dengan menjumlahkan hasil perkalian antara setiap Faktor Indeks Kesehatan HIF_j dan bobotnya K_j , kemudian dibagi dengan skor maksimum dan dikalikan 100%, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (2). Hasil penilaian akhir terhadap indeks kesehatan transformator ini dapat diklasifikasikan atau diinterpretasikan seperti pada Tabel 6.

$$HI_{FINAL} = \frac{\sum_{j=1}^n K_j \times HIF_j}{\sum_{j=1}^n 4K_j} \times 100\% \quad (2)$$

Tabel 1. Penilaian Skor *Dissolved Gass Analysis* (DGA)

Gas (ppm)	Skor (S_i)						Bobot (W_i)
	1	2	3	4	5	6	
H ₂	≤100	100-200	200-300	300-500	500-700	>700	2
CH ₄	≤75	75-125	125-200	200-400	400-600	>600	3
C ₂ H ₆	≤65	65-80	80-100	100-120	120-150	>150	3
C ₂ H ₄	≤50	50-80	80-100	100-150	150-200	>200	3
C ₂ H ₂	≤3	3-7	7-35	35-50	50-80	>80	5
CO	≤350	350-700	700-900	900-1100	1100-1400	>1400	1

CO ₂	≤2500	2500 -3000	3000-4000	4000-5000	5000-7000	>7000	1
-----------------	-------	------------	-----------	-----------	-----------	-------	---

Tabel 2. Penilaian Skor Minyak Transformator [8], [16]

Parameter Minyak	Skor (S _i)				Bobot (W _i)
	1	2	3	4	
Breakdown Voltage (kV)	≥52	47-52	35-47	≤35	3
Water Content (ppm)	≤20	20-25	25-30	≥30	4
ACID (MgKOH/mg)	≤0,04	0,04-0,1	0,1-0,15	≥0,15	1
Interfacial Tension (dyne/cm)	≥30	23-30	18-23	≤18	2

Tabel 3. Penilaian Skor Furan [8]

Gas 2 FAL (ppb)	Nilai	Kondisi
0 – 100	A	Bagus
100 – 250	B	Normal
250 – 500	C	Waspada
500 – 1000	D	Jelek
> 1000	E	Sangat Jelek

Tabel 4. Penilaian Setiap Parameter [8], [17]

Nilai	kondisi	Deskripsi
A	Bagus	<1,2
B	Normal	1,2 ≤ x ≤ 1,5
C	Waspada	1,5 ≤ x < 2
D	Jelek	2 ≤ x < 3
E	Sangat Jelek	≥ 3

Tabel 5. Penilaian Skor Indeks Kesehatan Transformator [8], [18]

No.	Parameter Transformator	K _j	Rating Kondisi	HIF _j
1	Dissolved Gas Analysis (DGA)	10	A, B, C, D, E	4, 3, 2, 1, 0
2	Skor Minyak Transformator	8	A, B, C, D, E	4, 3, 2, 1, 0
3	Isolasi Kertas (Furan)	5	A, B, C, D, E	4, 3, 2, 1, 0

Tabel 6. Penilaian Akhir Indeks Kesehatan Transformator [8], [18]

Indeks Kesehatan (%)	Kondisi	Deskripsi	Prediksi Umur
85-100	Sangat Bagus	Penurunan kondisi dari komponen terbatas dan dilakukan normal <i>maintenance</i> .	Lebih dari 15 tahun
70-85	Bagus	Penurunan kondisi yang signifikan dari beberapa komponen dan dilakukan normal <i>maintenance</i> .	Lebih dari 10 tahun
50-70	Cukup	Penurunan kondisi menyebar atau serius pada komponen-komponen spesifik dan tingkatkan pengujian diagnostik, kemungkinan pekerjaan perbaikan atau penggantian yang diperlukan tergantung pada tingkat kekritisan.	Sampai 10 tahun

ANALISIS KONDISI KESEHATAN TRANSFORMATOR BERBASISKAN METODE INDEKS KESEHATAN DAN KEGAGALAN

30-50	Jelek	Penurunan kondisi serius dan menyebar lebih luas pada komponen-komponen spesifik dan mulai proses perencanaan untuk mengganti atau membangun kembali dengan mempertimbangkan risiko dan konsekuensi kegagalan.	Kurang dari 3 tahun
0-30	Sangat Jelek	Penurunan kondisi serius dan menyebar lebih luas pada komponen-komponen spesifik dan segera nilai risiko; ganti atau bangun kembali berdasarkan penilaian	0 tahun

B. Total Dissolved Combustible Gas (TDCG)

Metode analisis *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG) digunakan sebagai salah satu pendekatan penting dalam pengawasan kondisi transformator, khususnya dalam mendeteksi degradasi material isolasi. Prinsip utama metode ini adalah menghitung total *volume* gas yang terbentuk akibat proses degradasi, di mana gas-gas yang dihitung meliputi hidrogen (H_2), metana (CH_4), etana (C_2H_6), etilena (C_2H_4), asetilena (C_2H_2), dan karbon monoksida (CO). Standar IEEE C57.104-2008 yang ditampilkan pada Tabel 7 menjadi acuan dalam analisis TDCG untuk menetapkan batas konsentrasi gas yang dapat diterima untuk menilai kondisi operasional transformator. Gas karbon dioksida (CO_2) tidak termasuk dalam TDCG karena sifatnya yang tidak mudah terbakar.

Tabel 7. Konsentrasi Gas Terlarut [11]

Status	Batas Konsentrasi Gas Utama Terlarut (ppm)							TDCG
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2	
Kondisi 1	100	120	35	50	65	350	2500	720
Kondisi 2	100-700	121-400	36-50	51-100	66-100	351-570	2500-4000	721-1920
Kondisi 3	701-1800	401-1000	51-80	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
Kondisi 4	>1800	>1000	>80	>200	>150	>1400	>10000	>4630

Berdasarkan total TDCG, standar IEEE C57.104-2008 mengklasifikasikan kondisi transformator ke dalam empat tingkatan:

1. Kondisi 1, TDCG menunjukkan bahwa transformator beroperasi dengan baik dan dalam batas aman.
2. Kondisi 2, TDCG melebihi kisaran normal gas yang mudah terbakar. Jika salah satu gas mencapai batas level tertentu, perlu dilakukan investigasi cepat untuk menentukan penyebabnya.
3. Kondisi 3, TDCG berada pada level yang mengindikasikan kerusakan tingkat tinggi, sehingga diperlukan investigasi segera.
4. Kondisi 4, TDCG mencapai level yang mengindikasikan kerusakan parah pada isolasi selulosa atau minyak. Operasi transformator yang terus dilanjutkan dalam kondisi ini dapat mengakibatkan kegagalan total pada peralatan.

Tindakan yang tepat perlu dilakukan saat gas minyak transformator tiba-tiba meningkat, karena hal ini dapat mengindikasikan adanya potensi gangguan pada

peralatan tersebut. Tabel 8 menyajikan interval pengambilan sampel yang direkomendasikan beserta prosedur operasional untuk berbagai tingkat TDCG [dalam mikroliter/liter (ppm)] mengacu pada standar IEEE C57.104-2008 [11].

Tabel 8. Tindakan berdasarkan TDCG dalam Minyak Transformator [8], [19]

Level TDCG (ppm)	Rating TDCG (ppm/hari)	Interval Sampling	Prosedur Operasi
<720	<10	Per 12 Bulan	Kontinyu Operasi dan <i>Maintenance</i> Normal
	10-30	Per 3 Bulan	
	>30	Per 1 Bulan	
721-1920	<10	Per 4 Bulan	- Penggunaan transformator perlu diperhatikan. - Pada kondisi ini perlu dilakukan analisis individual gas - Diatur penetapan besarnya pembebanan.
	10-30	Per 1 Bulan	
	>30	Per 1 Bulan	
1921-4630	<10	Per 1 Bulan	- Ekstra Hati-hati - Analisis untuk masing-masing gas - Rencanakan melakukan pemadaman - Menyarankan penggantian
	10-30	Per 1 Minggu	
	>30	Per 1 Minggu	
>4630	<10	Per 1 Minggu	- Transformator pada kondisi ini perlu dipertimbangkan untuk dilepaskan dari sistem - Pertimbangkan untuk melakukan perbaikan dan menyarankan penggantian - Ekstra Hati-hati - Analisis untuk masing-masing gas - Rencanakan pemadaman
	10-30	Per Hari	
	>30	Per Hari	

C. Roger's Ratio

Metode lain yang umum digunakan untuk menganalisis gas terurai pada minyak isolasi transformator adalah metode *Roger's Ratio*. Metode ini didasarkan pada rasio konsentrasi gas-gas yang terbentuk akibat adanya gangguan di dalam transformator. Lima *fault gas* yang digunakan dalam analisis ini adalah Asetilena (C_2H_2), Etilena (C_2H_4), Etana (C_2H_6), Metana (CH_4), dan Hidrogen (H_2). Dari kelima gas tersebut, dihitung tiga rasio utama untuk mendeteksi jenis gangguan yang terjadi. Hasil dari perhitungan ketiga rasio dikonversi menjadi kode tiga digit yang sesuai dengan kategori gangguan seperti ditunjukkan pada Tabel 9 yang mengacu pada standar IEEE C57.104-2008.

Tabel 9. Analisis dengan Menggunakan Metode Roger Rasio

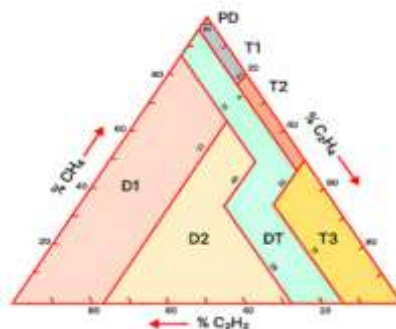
Rentang Kode Rasio		$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
<0,1		0	1	0
0,1-1		1	0	0
1-3		1	2	1
≥ 3		2	2	2
Kasus	Tipe Gangguan	Kode Rasio Roger		
0	Normal	0	0	0
1	Peluahan Parsial Rendah	0	1	0
2	Peluahan Parsial Tinggi	1	1	0
3	Busur Listrik, Pelepasan, Percikan Rendah	1-2	0	1-2
4	Busur Listrik, Pelepasan, Percikan Tinggi	1	0	2
5	Panas Pada Temperatur <150°C	0	0	1
6	Panas Pada Temperatur antara 150°C - 300°C	0	2	0

ANALISIS KONDISI KESEHATAN TRANSFORMATOR BERBASISKAN METODE INDEKS KESEHATAN DAN KEGAGALAN

7	Panas Pada Temperatur antara 300°C - 700°C	0	2	1
8	Panas Pada Temperatur >700°C	0	2	2

D. Duval's Triangle

Metode *Duval's Triangle* atau segitiga Duval merupakan pendekatan diagnostik yang dikembangkan mengacu pada standar IEC 60599 [20] sebagai alternatif dari metode rasio Roger. Salah satu kelemahan utama metode rasio Roger adalah keterbatasannya dalam mengidentifikasi jenis kegagalan yang sesuai dengan kode yang ada pada Tabel 9. Untuk mengatasi hal ini, metode segitiga Duval dikembangkan dalam bentuk sistem tertutup yang dapat meminimalkan hasil diagnosis yang tidak memenuhi kriteria.



Gambar 1. Duvals Triangle [5]

Tabel 10. Indikasi Gangguan Metode *Duvals Triangle* [6]

Zona Gangguan	Indikasi Gangguan
PD	Peluahan Parsial (<i>Partial Discharge</i>)
D1	Pelepasan Listrik Energi Rendah (<i>Discharge of low energy</i>)
D2	Pelepasan Listrik Energi Tinggi (<i>Discharge of high energy</i>)
T1	Panas dengan Temperatur (<i>Thermal Fault</i>), $\leq 300^{\circ}\text{C}$
T2	Panas dengan Temperatur (<i>Thermal Fault</i>), $300^{\circ}\text{C} < T \leq 700^{\circ}\text{C}$
T3	Panas dengan Temperatur (<i>Thermal Fault</i>), $> 700^{\circ}\text{C}$
DT	<i>Mixtures thermal and electrical fault</i>

Salah satu keuntungan metode ini adalah dapat memberikan diagnosis dengan persentase kesalahan yang rendah. Metode segitiga Duval ini dipresentasikan dalam 7 zona gangguan pada segitiga sama sisi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Analisis ini berfokus pada tiga jenis gas terlarut dalam minyak, yaitu metana (CH_4), etilena (C_2H_4), dan asetilena (C_2H_2), dengan konsentrasi total ketiga gas ini adalah 100%. Prosesnya dimulai dengan menghitung persentase masing-masing gas terhadap total ketiga gas tersebut. Berdasarkan persentase ini, garis-garis ditarik sejajar dengan sisi-sisi segitiga, hingga diperoleh satu titik temu yang merepresentasikan kombinasi gas tersebut. Lokasi titik temu tersebut menjadi hasil dari analisis yang merepresentasikan jenis kegagalan tertentu pada minyak isolasi transformator. Selanjutnya, indikasi gangguan yang terjadi diturunkan dan diinterpretasikan berdasarkan ketentuan yang ada pada Tabel 10.

HASIL DAN ANALISA

A. Spesifikasi dan Data Hasil Uji Transformator

Transformator yang akan dibahas pada penelitian ini terdiri dari 2 transformator yaitu, transformator ID:TR 18.4 dan transformator ID:TR 18.6. Hasil pengujian dari kedua transformator ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Data Hasil Pengujian Transformator

Transformator		ID:TR 18.4	ID:TR 18.6
Dissolved Gas Analysis (DGA)			
No	Parameter of Test	Satuan	Test Result
1	Hydrogen (H2)	ppm	7 1,9
2	Methane (CH4)	ppm	24 3
3	Ethane (C2H6)	ppm	3 2,9
4	Ethylene (C2H4)	ppm	49 7,9
5	Acetylene (C2H2)	ppm	0,23 0,23
6	Carbon Monoxide (CO)	ppm	909 538
7	Carbon Dioxide (CO2)	ppm	7979 4764
Furan Analysis (Liquid - Liquid Extraction)			
8	2-furfurol	ppb	7,9 7,9
Phisycal and Chemical Test			
9	Breakdown Voltage	kV	40 53
10	Water Content	ppm	17 15
11	Total Acid Number	Mg KOH/g	0,02 0,01
12	Interfacial Tension @25 °C	mN/m	27,5 39,5

B. Hasil Diagnosis dan Pembahasan

Tabel 12 merupakan hasil diagnosis akhir dari transformator 1 dan 2. Diagnosis ini diperoleh melalui serangkaian interpretasi data dan analisis kondisi transformator, yang mencakup penilaian indeks kesehatan dan identifikasi jenis kegagalan yang berpotensi untuk terjadi menggunakan beberapa metode analisis. Penilaian kondisi kesehatan dilakukan dengan metode indeks kesehatan dan analisis kegagalan berbasis gas terlarut.

Tabel 12. Hasil Diagnosis Akhir Keadaan Transformator

Nama Transformator	Indeks Kesehatan	Perkiraan Umur	Analisis Kegagalan	Rekomendasi Tindakan
Transformator 1 (ID: TR 18.4)	72%	Lebih dari 10 tahun	Overheating (Thermal Fault >700°C)	- Penggunaan transformator perlu diperhatikan. - Pada kondisi ini perlu dilakukan analisis individual gas - Interval sampling lebih sering dilakukan, bisa per 3 bulan atau bulanan
Transformator 2 (ID: TR 18.6)	89%	Lebih dari 15 tahun	Overheating (Thermal Fault >700°C)	- Dapat beroperasi normal dengan interval sampling per 12 bulan dan melakukan <i>maintenance</i> seperti biasa.

Pada transformator 1 (ID: TR 18.4), hasil perhitungan menunjukkan nilai indeks kesehatan sebesar 72%. Nilai ini dipengaruhi oleh buruknya nilai *interfacial tension* (IFT) dan penurunan *breakdown voltage*. Sementara itu, Transformator 2 (ID: TR 18.6) memiliki nilai indeks kesehatan sebesar 89%. Mengacu pada Tabel 6, kedua transformator tersebut termasuk dalam kategori “Bagus” dan “Sangat Bagus”, dengan prediksi umur lebih dari 10 tahun untuk Transformator 1 dan lebih dari 15 Tahun untuk

ANALISIS KONDISI KESEHATAN TRANSFORMATOR BERBASIS METODE INDEKS KESEHATAN DAN KEGAGALAN

Transformator 2. Kedua transformator dikategorikan pada kondisi yang sehat dimana sejalan dengan penelitian terdahulu Naderian *et al* yang menjelaskan “Dalam hal ini, 86% dari transformator memiliki *Health Index* lebih dari 70% (baik dan sangat baik). Klasifikasi ini memberikan gambaran umum kepada utilitas tentang kondisi kesehatan aset secara keseluruhan” [2]. Hubungan antara nilai indeks kesehatan dengan probabilitas populasi kegagalan cukup kuat, karena semakin kecil nilai indeks kesehatan maka semakin besar probabilitas kegagalan.

Pada transformator 1 terdeteksi adanya indikasi kegagalan melalui analisis TDCG. Hasil penjumlahan pada gas-gas yang mudah terbakar menunjukkan nilai TDCG transformator 1 sebesar 992,23 ppm, yang telah melebihi ambang batas normal yaitu 720 ppm. Selanjutnya, analisis *Roger's Ratio* berdasarkan Tabel 9 mengindikasikan adanya kegagalan jenis *overheating* pada Transformator 1, yaitu panas berlebih dengan suhu mencapai $>700^{\circ}\text{C}$. Hal ini juga divalidasi oleh diagnostik dengan menggunakan metode *Duval's Triangle* yang ditunjukkan oleh titik temunya terletak pada area T3. Berdasarkan standar pada Tabel 10, daerah ini menunjukkan kegagalan akibat *overheating* suhu lebih dari 700°C , mengonfirmasi hasil analisis *Roger's Ratio* sebelumnya.

Sedangkan transformator 2, setelah dilakukan penjumlahan pada gas-gas yang mudah terbakar, didapatkan hasil dari TDCG-nya adalah 553,93 ppm. TDCG berada dalam kisaran normal yaitu dibawah 720 ppm. Namun, hasil analisis *Roger's Ratio* dan *Duval's Triangle* juga menunjukkan indikasi kegagalan *overheating* dengan suhu melebihi 700°C . *Overheating* ini dapat terjadi akibat adanya kontaminasi minyak sehingga fungsi minyak tidak lagi dapat menjadi pendingin bagi transformator.

Dalam rangka mitigasi kegagalan, terdapat dua metode perbaikan minyak transformator yang dapat dilakukan, yaitu rekondisi dan reklamasi. Jika permasalahan terdapat pada *breakdown voltage* dan *water content* yang mengalami pemburukan, maka tindakan yang disarankan adalah rekondisi atau filtrasi. Sementara itu, jika nilai *acid* dan IFT menunjukkan degradasi, maka tindakan reklamasi perlu dipertimbangkan. Untuk kedua transformator, disarankan dilakukan proses filtrasi guna menurunkan kandungan gas-gas yang bersifat merusak minyak. Berdasarkan hasil TDCG, Transformator 1 memerlukan perhatian khusus dalam operasionalnya, termasuk analisis gas individu dan peningkatan frekuensi sampling, misalnya setiap tiga bulan atau bahkan bulanan. Sedangkan Transformator 2 masih dapat dioperasikan secara normal dengan interval sampling tahunan (12 bulan) serta pemeliharaan rutin sesuai standar operasional.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh menggunakan metode indeks kesehatan, Transformator 1 dan 2 memiliki indeks kesehatan masing-masing 72% dan 89%, yang menunjukkan kondisi “Bagus” dan “Sangat Bagus”, dengan prediksi umur lebih dari 10 tahun untuk Transformator 1 dan lebih dari 15 Tahun untuk Transformator 2. Namun, hasil analisis TDCG, *Roger's Ratio*, dan *Duval's Triangle* mengindikasikan adanya kegagalan *overheating* ($>700^{\circ}\text{C}$) pada keduanya, yang menunjukkan degradasi isolasi minyak. Transformator 1 memerlukan pemantauan lebih intensif dengan interval sampling lebih pendek, sementara Transformator 2 masih dapat dioperasikan normal. Kedua transformator direkomendasikan untuk dilakukan filterisasi minyak.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Aslam, M. N. Arbab, A. Basit, T. Ahmad, and M. Aamir, "A review on fault detection and condition monitoring of power transformer," *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, vol. 6, no. 8, pp. 100–110, Aug. 2019, doi: 10.21833/ijaas.2019.08.014.
- [2] A. Naderian, S. Cress, R. Piercy, F. Wang, and J. Service, "An approach to determine the health index of power transformers," in *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vancouver, BC, Canada: IEEE, Jul. 2008, pp. 192–196. doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570308.
- [3] A. Naderian Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. Service, and F. Wang, "An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 20–34, Mar. 2009, doi: 10.1109/MEI.2009.4802595.
- [4] W. R. Tamma, R. A. Prasajo, and Suwarno, "High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate," *High Voltage*, pp. 1–14, 2021, doi: 10.1049/hve2.12074.
- [5] R. P. Budhihadi and B. Sudiarto, "Analysis of Transformer Oil Condition of Dissolved Gas Analysis (DGA) Testing Results with Modified Conventional Methods," *International Journal of Electrical, Computer, and Biomedical Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 424–437, Dec. 2024, doi: 10.62146/ijecbe.v2i4.72.
- [6] H. Syafruddin and H. P. Nugroho, "Dissolved Gas Analysis (DGA) for diagnosis of fault in oil-immersed power transformers: A case study," in *2020 4th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering, ELTICOM 2020 - Proceedings*, IEEE, Sep. 2020, pp. 57–62. doi: 10.1109/ELTICOM50775.2020.9230491.
- [7] S. Surawijaya, R. A. Prasajo, W. R. Tamma, I. G. N. Mahendrayana, and Suwarno, "Diagnosis of Power Transformer Condition using Dissolved Gas Analysis Technique: Case Studies at Geothermal Power Plants In Indonesia," in *2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, Bali, Indonesia: IEEE, Oct. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011106.
- [8] A. Cabdra M, D. Anton Asfani, and I. G. N. S. Hernanda, "Diagnosis Transformator Daya Menggunakan Metode Indeks Kesehatan Transformator," *Jurnal Teknik POMITS*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [9] A. Siswanto, A. Rohman, S. Suprijadi, M. Baehaqi, and A. Arifudin, "Analisis Karakteristik Minyak Transformator Menggunakan Pengujian Dissolved Gas Analysis (DGA) Pada IBT 1 Gardu Induk," *Foristek*, vol. 12, no. 1, pp. 30–42, Mar. 2022, doi: 10.54757/fs.v12i1.142.
- [10] E. T. Mharakurwa and R. Goboza, "Multiparameter-based fuzzy logic health index assessment for oil-immersed power transformers," *Advances in Fuzzy Systems*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/2647157.
- [11] IEEE Std C57.104-2008, "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers," Feb. 02, 2009, *IEEE Power & Energy Society*, New York: IEEE Std C57.104™-2008.
- [12] IEEE Std C57.106-2006, "IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment," Jun. 06, 2007, *IEEE Power Engineering Society*, New York.

ANALISIS KONDISI KESEHATAN TRANSFORMATOR BERBASISKAN METODE INDEKS KESEHATAN
DAN KEGAGALAN

- [13] IEC 60422, “Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance,” 2005, *IEC*.
- [14] IEC 60505, “Evaluation and qualification of electrical insulation systems,” 2004, *IEC*.
- [15] CIGRÉ Working Group 05, “An international survey on failures in large power transformers in service,” 88, May 1983.
- [16] A. Kurniawan, Y. Rahmawati, and H. Putranto, “Studi Performa Transformator Daya Menggunakan Metode Health Index di Gardu Induk Waru Sidoarjo,” in *SinarFe7*, Malang, 2019, pp. 33–38.
- [17] S. Li, X. Li, Y. Cui, and H. Li, “Review of Transformer Health Index from the Perspective of Survivability and Condition Assessment,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 12, no. 11, pp. 1–24, Jun. 2023, doi: 10.3390/electronics12112407.
- [18] A. Rosyiddin and B. Baddarudin, “Analisis Prediksi Dan Kondisi Umur Transformator pada BAT GT 2.1 PLTGU Priok Menggunakan Metode Health Index,” *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 14, no. 2, pp. 90–96, May 2023, doi: 10.22441/jte.2023.v14i2.006.
- [19] S. Yudhapraja and A. Sabastian Prayogi, “Analisa Gejala Kerusakan Transformator Berdasarkan Dissolved Gas Analysis Pembangkit PLTA Way Besai,” in *1st National Conference of Industry, Engineering and Technology 2020*, Semarang: NCIET, 2020, pp. 13–23.
- [20] IEC 60599, *Mineral oil-filled electrical equipment in service : guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis*. IEC, 2015.