

Analisis Kondisi Minyak Transformator Daya 80 MVA Menggunakan Metode *Health Index Multi-Parameter*

Ananta Deka Ramadhani

S1 Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: 24050514019@mhs.unesa.ac.id

Ali Nur Fathoni, Subuh Isnur Haryudo, Fendi Achmad

S1 Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: alifathoni@unesa.ac.id, subuhisnur@unesa.ac.id, fendiachmad@unesa.ac.id

Abstrak

Minyak transformator merupakan bagian penting dari sistem isolasi yang berfungsi sebagai media isolasi listrik dan pendingin selama transformator beroperasi. Penurunan kualitas minyak akibat panas, oksidasi, kelembapan, dan tekanan listrik dapat mempengaruhi keandalan transformator. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi minyak transformator menggunakan metode *Health Index* dengan mengintegrasikan parameter *Dissolved Gas Analysis* (DGA), *Oil Quality*, dan *Furan*. Data diperoleh melalui pengujian DGA, *Breakdown Voltage* (BDV), *Water Content*, *Interfacial Tension* (IFT), *Acidity*, *Colour*, dan 2-FAL. Setiap parameter diberikan skor dan bobot, kemudian dikonversi menjadi *Health Index Factor* (HIF) untuk memperoleh nilai *Health Index* secara keseluruhan. Hasil analisis menunjukkan bahwa kelompok DGA memiliki nilai HIF sebesar 3,22 tapi diagnosis *Duval's Triangle* pada DGA berada pada zona gangguan *Partial Discharge*, *Oil Quality* sebesar 1,83, dan *Furan* sebesar 4,00. Nilai *Oil Quality* yang rendah terutama dipengaruhi oleh BDV sebesar 25 kV yang berada pada kategori D dan *Water Content* sebesar 40,4 ppm berada pada kategori E. Sementara itu, nilai 2-FAL sebesar 75,40 ppb berada pada kategori A dengan kondisi bagus. Berdasarkan integrasi seluruh parameter, diperoleh nilai *Health Index* sebesar 72,65% yang termasuk dalam kategori Bagus. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi transformator secara keseluruhan masih berada pada kondisi baik, dengan parameter BDV dan *Water Content* menjadi aspek yang perlu mendapat perhatian dalam kegiatan pemantauan dan pemeliharaan.

Kata Kunci: *Health Index, Dissolved Gas Analysis, Oil Quality, Furan, Oil transformer.*

Abstract

Transformer oil is an important part of the insulation system, serving as both an electrical insulating medium and a cooling medium during transformer operation. Deterioration in oil quality due to heat, oxidation, moisture, and electrical stress can affect transformer reliability. This study aims to evaluate the condition of transformer oil using the Health Index method by integrating Dissolved Gas Analysis (DGA), Oil Quality, and Furan parameters. The data were obtained through DGA, Breakdown Voltage (BDV), Water Content, Interfacial Tension (IFT), Acidity, Colour, and 2-FAL testing. Each parameter was assigned a score and weighting factor, then converted into a Health Index Factor (HIF) to obtain the overall Health Index value. The analysis results showed that the DGA group had an HIF value of 3.22, while the Duval Triangle diagnosis of the DGA indicated a Partial Discharge fault zone. The Oil Quality group had an HIF value of 1.83, mainly influenced by a BDV value of 25 kV, which was classified as category D, and a Water Content value of 40.4 ppm, which was classified as category E. Meanwhile, the 2-FAL value of 75.40 ppb was classified as category A, indicating good condition. Based on the integration of all parameters, the overall Health Index was 72.65%, which falls into the good category. These results indicate that the overall condition of the transformer remains good, with BDV and Water Content being the parameters that require attention in monitoring and maintenance activities.

Keywords: *Health Index, Dissolved Gas Analysis, Oil Quality, Furan, Oil transformer.*

PENDAHULUAN

Transformator merupakan salah satu komponen utama yang berperan penting dalam sistem tenaga listrik untuk menyalurkan energi listrik dari pembangkit hingga ke konsumen, Baik dalam kegiatan rumah tangga maupun industri. Energi listrik telah menunjang aktivitas masyarakat sebagai sumber energi utama. Ketersediaan

sumber energi listrik harus andal dan kontinu terutama pada transformator yang dimana sangat butuh perawatan secara rutin. Keandalan sistem penyaluran tidak hanya dipengaruhi oleh proses pembangkitan dan distribusi, tetapi juga oleh kondisi peralatan yang digunakan, khususnya Transformator. Oleh sebab itu, transformator juga memerlukan pemeliharaan secara berkala untuk

menjaga keandalan dan kontinuitas operasinya. Salah satu bagian yang perlu mendapatkan perhatian dalam pemeliharaan transformator ialah minyak isolasi, karena minyak transformator adalah salah satu bagian dari sistem isolasi yang tidak hanya berfungsi sebagai media isolasi listrik, tetapi juga sebagai media pendingin yang membantu menjaga kestabilan temperatur selama transformator beroperasi (Alfirdaus et al., 2026; Ali & Kriska, 2024).

Ketahanan operasional pada transformator sangat bergantung pada umur dan kualitas sistem isolasinya, yaitu minyak transformator. Selain berfungsi sebagai media isolasi dan pendingin, minyak transformator juga mampu melarutkan gas-gas yang terbentuk akibat penurunan sistem isolasi padat (*cellulose*) dan cair (minyak). Selama beroperasinya transformator, maka minyak isolasi akan mengalami perubahan akibat pengaruh panas, beban, oksidasi, serta tekanan listrik yang berlangsung secara terus-menerus. Hal tersebut dapat mengakibatkan penurunan kemampuan minyak transformator sebagai media isolasi dan pendingin. Proses degradasi juga dapat mengakibatkan senyawa dan gas terlarut pada minyak yang menjadi indikasi perubahan kondisi di dalam transformator (Mustafa et al., 2024). Jika degradasi tidak ditangani dengan baik, penurunan kualitas minyak dapat meningkatkan risiko gangguan pada sistem isolasi dan pada akhirnya mempengaruhi keandalan operasi transformator. Oleh karena itu diperlukan pemantauan kondisi minyak secara rutin untuk mengetahui tingkat degradasi dan menentukan cara untuk pemeliharaan transformator (Alfirdaus et al., 2026; Siregar et al., 2025).

Metode yang banyak digunakan untuk mengetahui kondisi transformator melalui minyak isolasi adalah *Dissolved Gas Analysis* (DGA), yaitu analisis terhadap gas-gas terlarut yang terbentuk selama transformator beroperasi. Gas seperti *hydrogen* (H_2), *methane* (CH_4), *ethylene* (C_2H_4), *ethane* (C_2H_6), dan *acetylene* (C_2H_2), dapat memberikan informasi mengenai indikasi gangguan thermal maupun kelistrikan pada transformator, sedangkan *carbon monoxide* (CO) dan *carbon dioxide* (CO_2) dapat berkaitan dengan degradasi bahan isolasi padat (Mustafa et al., 2024). Selain DGA, *Breakdown Voltage* (BDV) digunakan untuk mengetahui kemampuan minyak dalam menahan tegangan listrik menjadi tembus listrik, sehingga dapat memberikan gambaran mengenai kekuatan dielektrik minyak (Park et al., 2026). Kedua parameter tersebut memiliki karakteristik informasi yang berbeda, tetapi dapat saling melengkapi dalam menggambarkan kondisi minyak isolasi. Apabila hasil pengujian menunjukkan adanya penurunan kondisi minyak, salah satu tindakan pemeliharaan yang dapat

dilakukan adalah *oil treatment* untuk mengurangi kontaminan dan memulihkan karakteristik isolasi minyak. Oleh karena itu, evaluasi kondisi minyak transformator tidak cukup hanya dilakukan berdasarkan perubahan satu parameter, tetapi perlu mempertimbangkan beberapa indikator secara terpadu agar perubahan kondisi dan tingkat pemulihan minyak dapat diketahui secara lebih menyeluruh (Ali & Kriska, 2024).

Untuk mengevaluasi kondisi dan tingkat penurunan kualitas minyak transformator, diperlukan pendekatan yang mampu mengintegrasikan hasil pengujian kondisi minyak. Salah satu solusinya dapat menggunakan metode *Health Index* (Badawi et al., 2022). *Health Index* adalah sebuah metode yang dapat menggabungkan data hasil pengujian laboratorium, inspeksi lapangan, dan pengamatan operasi. Metode ini menggunakan nilai numerik yang dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi aset (Kurniawan et al., 2023). Metode ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi dan tingkat degradasi aset berdasarkan perubahan nilai indeks kesehatan (Kurniawan et al., 2023; Rosma et al., 2025). Dalam penelitian ini, pendekatan *Health Index* diterapkan dengan mengintegrasikan indikator *Dissolved Gas Analysis* (DGA), *Breakdown Voltage* (BDV), *Water Content*, *Interfacial Tension* (IFT), *Colour* dan *Furan* untuk mengevaluasi perubahan kondisi minyak transformator (Chairul et al., 2025; Hidayana et al., 2024).

Penelitian terdahulu telah banyak yang mengembangkan *Health Index* dengan memanfaatkan berbagai parameter kondisi untuk memberikan gambaran mengenai tingkat kesehatan dan degradasi aset. Namun, penerapan *Health Index* masih lebih banyak diarahkan pada penilaian kondisi transformator secara umum, sedangkan pemanfaatannya untuk mengevaluasi perubahan kondisi minyak secara khusus masih terbatas. *Dissolved Gas Analysis* (DGA) dan *Breakdown Voltage* (BDV) umumnya dianalisis sebagai parameter yang berdiri sendiri, sehingga perubahan kondisi minyak perlu diperhatikan dengan sangat rutin. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan akan pendekatan yang dapat mengintegrasikan informasi dari DGA dan BDV untuk memberikan penilaian yang lebih menyeluruh terhadap perubahan kondisi minyak transformator.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini menerapkan pendekatan *Health Index* terintegrasi untuk mengevaluasi perubahan tingkat degradasi kondisi oli transformator 80 MVA berdasarkan kombinasi indikator *Dissolved Gas Analysis*, *Oil Quality*, dan *Furan*. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran kuantitatif mengenai perubahan kondisi minyak, serta menjadi dasar

dalam mengevaluasi tingkatan penurunan kondisi minyak pada transformator.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif untuk menganalisis tingkat degradasi dan menerapkan pendekatan Metode *Health Index* untuk mengintegrasikan hasil pengujian laboratorium dari *Dissolved Gas Analysis*, *Breakdown Voltage*, *Water Content*, *Interfacial Tension*, *Acidity*, dan *Furan* sebagai indikator kondisi minyak transformator (Rosma et al., 2025). Metode HI ini digunakan untuk mengubah hasil pengujian dari beberapa parameter tersebut menjadi suatu nilai indeks yang dapat menggambarkan kondisi minyak secara terpadu. Nilai HI dihitung pada kondisi minyak transformator, sehingga dapat diketahui tingkat degradasi melalui nilai indeks oil transformator yaitu *Dissolved Gas Analysis*, *Parameter Quality Oil*, dan *Furan*. Dengan demikian, hasil *Health Index* tidak hanya digunakan untuk mengetahui kondisi minyak secara individual berdasarkan masing-masing parameter, tetapi juga untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai perubahan dan tingkat pemulihan kondisi minyak transformator (Badawi et al., 2022).

Metode *Health Index*

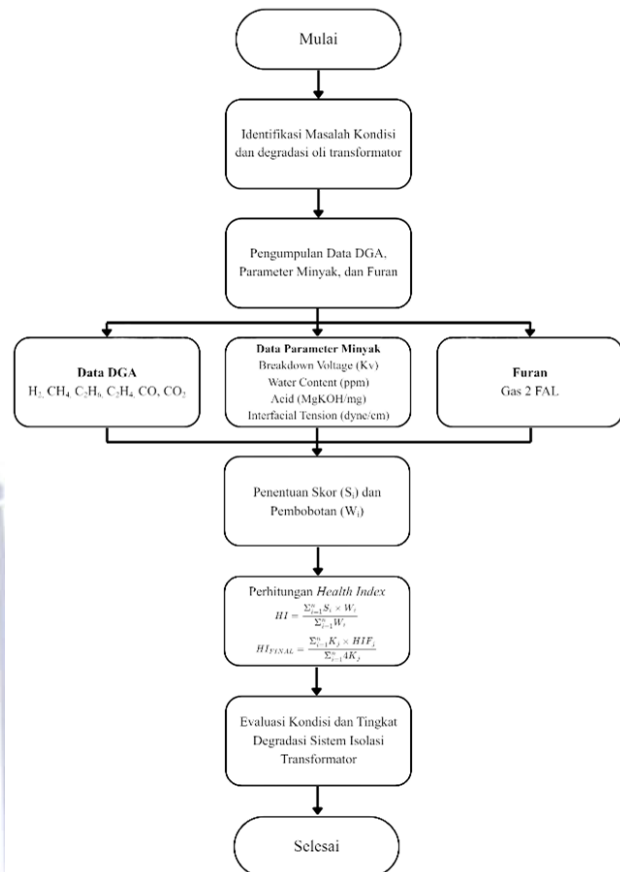
Nilai *Health Index* transformator, dihitung menggunakan beberapa parameter berdasarkan standar internasional menggunakan persamaan. Dimana n menunjukkan jumlah parameter yang digunakan, dan setiap parameter memiliki skor (S_i) dan factor bobot (W_i), setiap factor bobot (W_i) yang digunakan diambil dari standard IEEE.C57.104 (Rosma et al., 2025).

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

Parameter yang digunakan untuk penelitian ini ialah dari hasil pengujian dari *Dissolved Gas Analysis*, *Oil Quality*, dan *Furan*. Dengan beberapa kriteria penilaian yang ada pada Tabel 1 hingga Tabel 6 yang merujuk pada standard IEEE.C57.104.2019 dan standard IEC 60422-2013 (Kurniawan et al., 2023; Tamma et al., 2021; Wijayaningrum et al., 2024).

Hasil akhir dari HI_{FINAL} didapatkan melalui menjumlahkan hasil perkalian antara setiap faktor indeks kesehatan HIF_j dan bobotnya K_j , setelah itu dibagi dengan skor maksimum dan dikalikan 100%, seperti persamaan yang ada di bawah ini (Rosma et al., 2025).

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



Gambar 1. Flowchart Proses Metode *Health Index*

Berdasarkan Flowchart yang ada diatas, Langkah pertama yaitu mengidentifikasi masalah penurunan yang ada pada minyak transformator, Langkah selanjutnya mengumpulkan data yaitu *Dissolved Gas Analysis* (DGA), *Breakdown Voltage* (BDV), *Water Content*, *Interfacial Tension*, *Acidity*, dan *Furan*, Langkah berikutnya yaitu menentukan Skor (S_i) dan Pembobotan (W_i) di setiap parameter, Lalu setelah itu melakukan perhitungan hasil akhir dari nilai *Health Index* dan melakukan evaluasi pada kondisi dan tingkat degradasi sistem isolasi transformator.

Tabel 1. Penilaian Skor *Dissolved Gas 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.

Parameter minyak	Skor (S _i)				Bobot (W _i)
	1	2	3	4	
<i>Breakdown Voltage (Kv)</i>	≥ 50	45-50	40-45	≤ 40	3
<i>Water Content (ppm)</i>	≤ 20	20-25	25-30	≥ 30	4
<i>Acid (MgKOH/mg)</i>	≤ 0,1	0,1-0,15	0,15-0,2	≥ 0,2	1
<i>Interfacial Tension (dyne/cm)</i>	≥ 35	25-35	20-25	≤ 20	2
<i>Colour</i>	≤ 1,5	1,5-2	2-2,5	≥ 2,5	2

Tabel 3. Penilaian Skor Furan.

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

Untuk memudahkan proses penilaian kondisi setiap parameter, hasil skor yang diperoleh kemudian dikonversi ke dalam kategori kondisi A sampai E. Setiap kategori menunjukkan tingkat kondisi parameter mulai dari kondisi baik hingga sangat jelek. Klasifikasi kondisi tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai *Health Index Factor* (HIF) pada masing-masing kelompok parameter. Penilaian setiap parameter berdasarkan kategori kondisi A–E ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Penilaian Setiap Parameter.

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

Penilaian setiap parameter menghasilkan skor numerik, yang selanjutnya akan dikonversi di kategori A, B, C, D, dan E, dan akan dikonversi menjadi nilai Faktor *Health Index HIF_j* dengan penilaian dari 4 sampai 0 seperti pada Tabel 5 (Rosma et al., 2025).

Tabel 5. Penilaian Skor HI Transformator.

No	Parameter Transformator	K _j	Rating Kondisi	HIF _j
1	<i>Dissolved Gas Analysis</i>	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 (<i>Furan</i>)	5	A, B, C, D, E	4, 3, 2, 1, 0

Nilai *Health Index* yang diperoleh dari hasil perhitungan selanjutnya digunakan untuk menentukan kondisi keseluruhan transformator. Klasifikasi dilakukan berdasarkan rentang nilai *Health Index* yang terdiri dari kondisi sangat bagus, bagus, cukup, jelek, dan sangat jelek. Setiap kategori memiliki deskripsi kondisi serta prediksi umur transformator yang digunakan sebagai gambaran tingkat penurunan kondisi komponen. Kriteria penilaian akhir *Health Index* transformator ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Penilaian Akhir *Health Index* Transformator.

<i>Health Index</i> (%)	Kondisi	Deskripsi	Prediksi Umur
85-100	Sangat Bagus	Penurunan dari beberapa pada kondisi komponen terbatas dan dilakukan normal <i>maintenance</i>	Lebih dari 15 tahun
70-85	Bagus	Penurunan yang signifikan pada kondisi komponen dan dilakukan normal <i>maintenance</i>	Lebih dari 10 tahun
50-70	Cukup	Penurunan kondisi yang terjadi secara meluas maupun serius pada komponen tertentu memerlukan peningkatan pengujian diagnostik. Tindakan perbaikan atau penggantian komponen dapat dilakukan sesuai dengan tingkat kekritisan kondisinya.	10 tahun
30-50	Jelek	Penurunan kondisi yang semakin serius dan meluas pada komponen tertentu, sehingga diperlukan perencanaan penggantian atau pembangunan kembali dengan mempertimbangkan tingkat risiko serta dampak yang dapat ditimbulkan akibat kegagalan.	Kurang dari 10 tahun
0-30	Sangat Jelek	Kondisi komponen tertentu mengalami penurunan yang cukup serius dan semakin meluas, sehingga perlu dilakukan penilaian risiko secara segera sebagai dasar untuk menentukan tindakan penggantian atau pembangunan kembali.	0 tahun

Berdasarkan Tabel 6, nilai *Health Index* yang semakin tinggi menunjukkan kondisi transformator yang semakin baik, sedangkan nilai yang semakin rendah menunjukkan tingkat penurunan kondisi yang semakin serius. Klasifikasi tersebut digunakan sebagai acuan dalam menginterpretasikan nilai *Health Index* yang diperoleh dari hasil pengujian DGA, *Oil Quality*, dan *Furan*.

Roger's Ratio

Roger's Ratio merupakan metode yang umum digunakan dalam menganalisis gas terurai pada minyak transformator. Metode ini berdasarkan rasio konsentrasi gas yang terbentuk akibat gangguan didalam transformator. Ada 5 gas yang digunakan dalam analisis yaitu *Acetylene* (C₂H₂), *Ethylene* (C₂H₄), *Ethane* (C₂H₆), *Methane* (CH₄), *Hydrogen* (H₂). 5 gas tersebut dihitung 3 rasio utama dalam mendeteksi jenis gangguan. Dari hasil perhitungan rasio tersebut akan dikonversi menjadi sebuah

kode, yang sesuai dengan kategori gangguan seperti pada Tabel 7 yang merujuk pada standard IEEE C57.104-2008 (Rosma et al., 2025).

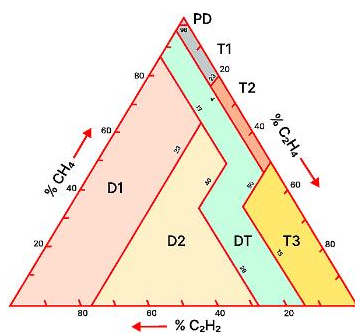
Tabel 7. Analisis Metode *Roger's Ratio*

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

Duval's Triangle

Duval's Triangle adalah metode pendekatan diagnostik yang mengacu pada standard IEC 60599, sebagai metode alternatif dari metode *Roger's Ratio*. Kelemahan dari *Roger's Ratio* yaitu memiliki keterbatasan untuk mengidentifikasi adanya kegagalan yang sesuai dengan kode pada Tabel 7. Dengan adanya metode *Duval's Triangle*, hal ini dapat diatasi dengan metode *Duval's Triangle* yang dapat meminimalkan hasil diagnosis yang tidak dapat memenuhi kriteria (Budhihadi & Sudiarto, 2024; Rosma et al., 2025).

Gambar 2. Metode *Duval's Triangle*

Tabel 8. Jenis-jenis Gangguan

PD	<i>Partial Discharge</i>
D1	<i>Discharge of low energy</i>
D2	<i>Discharge of high energy</i>
T1	<i>Thermal Fault, $\leq 300^\circ\text{C}$</i>
T2	<i>Thermal Fault, $300^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}$</i>
T3	<i>Thermal Fault, $> 700^\circ\text{C}$</i>
DT	<i>Electrical fault & Thermal Fault</i>

Kelebihan dari metode ini dapat memberikan suatu diagnosis dengan tingkat kesalahan yang rendah. Metode ini dipresentasikan pada 7 zona gangguan pada *Duval's Triangle*. Analisis ini berfokus pada 3 jenis gas dalam minyak, yaitu CH_4 , C_2H_4 , dan C_2H_2 , dengan konsentrasi dari ketiga gas ini yaitu 100%. Prosesnya dengan menghitung presentase dari gas-gas, terhadap ketiga gas tersebut. Berdasarkan presentase tersebut, garis-garis tersebut ditarik sejajar dengan sisi-sisi pada segitiga, hingga bertemu satu titik yang mempresentasikan kombinasi dari gas tersebut. Lokasi pada titik tersebut akan menjadi hasil dari analisis representasi jenis kegagalan tertentu pada minyak transformator, setelah itu indikasi gangguan yang terjadi diturunkan dan diinterpretasikan berdasarkan ketentuan pada Tabel 8 (Rosma et al., 2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Dissolved Gas Analysis

Pengujian *Dissolved Gas Analysis* dilakukan untuk mengetahui kondisi minyak isolasi berdasarkan konsentrasi gas terlarut yang terbentuk selama transformator beroperasi. Gas yang dianalisis meliputi *Hydrogen* (H_2), *Methane* (CH_4), *Ethane* (C_2H_6), *Ethylene* (C_2H_4), *Acetylene* (C_2H_2), *Carbon Monoxide* (CO) dan *Carbon Dioxide* (CO_2). Masing-masing gas memiliki karakteristik yang dapat memberikan informasi mengenai proses degradasi termal maupun kelistrikan pada sistem isolasi transformator (Rohmadoni & Perdana, 2026; Rosma et al., 2025).

Hasil pengujian *Dissolved Gas Analysis* selanjutnya dibandingkan dengan kriteria penilaian yang telah ditetapkan pada Tabel 1. Perbandingan tersebut dilakukan untuk memperoleh skor setiap gas berdasarkan rentang konsentrasinya. Skor yang diperoleh kemudian digunakan dalam menentukan kondisi *Dissolved Gas Analysis* sebagai salah satu komponen dalam perhitungan *Health Index*.

Yang pertama melakukan perhitungan nilai HI setiap parameter yang akan dikonversi ke kategori A-E lalu dikonversi lagi ke HIF_j menggunakan rumus berikut :

$$HI = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

Nilai *Dissolved Gas Analysis* kemudian dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$HIF_{DGA} = \frac{\sum_{i=1}^n (HIF_j \cdot W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} 100\% = \frac{(4,2)+(0,3)+(4,3)+(4,5)+(4,1)+(2,1)}{2+3+3+3+5+1+1} 100\% \quad (4)$$

$$HIF_{DGA} = \frac{58}{18} 100\% = 3,22 \quad (5)$$

Tabel 7. Hasil Analisis *Dissolved Gas Analysis*

Parameter Gas	Hasil Pengujian (ppm)	Skor (S_i)	Bobot (W_i)	Kondisi (A/B/C/D/E)	HIF_j
H ₂	0	1	2	A	4
CH ₄	455,6	5	3	E	0
C ₂ H ₆	0	1	3	A	4
C ₂ H ₄	0	1	3	A	4
C ₂ H ₂	0	1	5	A	4
CO	0	1	1	A	4
CO ₂	1077,2	2	1	C	2
Hasil HIF_{DGA}			3,22		

Berdasarkan Tabel 7, kriteria penilaian yang digunakan, sebagian besar parameter gas berada pada kondisi B, sedangkan parameter C₂H₄ berada pada kondisi A. Nilai skor (S_i) masing-masing parameter kemudian digunakan bersama bobot (W_i) dalam perhitungan indeks kondisi DGA sebagai salah satu komponen dalam penentuan *Health Index* transformator.

Perhitungan dilakukan dengan mengkalikan nilai HIF setiap parameter dengan bobotnya, kemudian menjumlahkan seluruh hasil perkalian dan membaginya dengan total bobot. Dari data pengujian diperoleh nilai HIF untuk H₂ sebesar 4 dengan bobot 2, CH₄ sebesar 0 dengan bobot 3, C₂H₆ sebesar 4 dengan bobot 3, C₂H₄ sebesar 4 dengan bobot 3, C₂H₂ sebesar 4 dengan bobot 5, CO sebesar 4 dengan bobot 1, dan CO₂ sebesar 2 dengan bobot 1. Dengan demikian, perhitungan tersebut menunjukkan bahwa nilai HIF_{DGA} adalah 3,22, yang selanjutnya digunakan sebagai salah satu komponen dalam perhitungan *Health Index* transformator.

Roger's Ratio

Untuk memperkuat analisis DGA, perlu metode diagnosis pendukung seperti *Roger's Ratio*. Metode ini

menggunakan suatu perbandingan dalam konsentrasi gas terlarut untuk mengidentifikasi gangguan pada minyak transformator. Rasio yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

$$R1 = \frac{CH_4}{H_2} \quad (6)$$

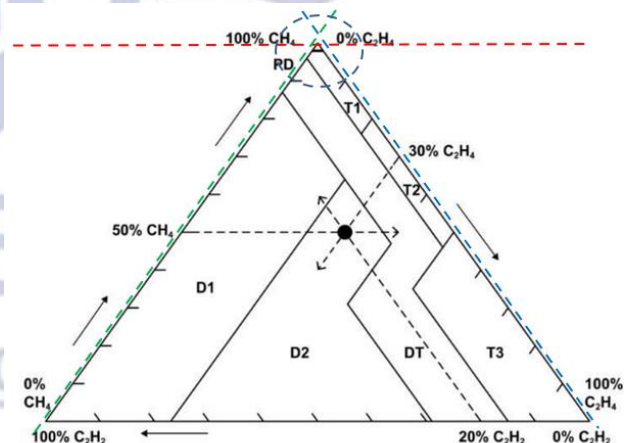
$$R2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad (7)$$

$$R5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \quad (8)$$

Berdasarkan data pengujian diperoleh CH₄ sebesar 455,6 ppm, H₂ sebesar 0 ppm, C₂H₂ sebesar 0 ppm, C₂H₄ sebesar 0 ppm, dan C₂H₆ sebesar 0 ppm. Dan hasil dari masing-masing rasio tidak terdefinisi. Pada R1, R2, dan R5, salah satu parameter memiliki nilai sebesar 0 ppm yang menyebabkan pembagian dengan 0 tidak dapat dihitung. Dengan demikian, *Roger's Ratio* tidak menghasilkan nilai rasio yang dapat dipetakan ke dalam diagnosis pada kondisi data penelitian ini.

Duval's Triangle

Selain menggunakan metode *Roger's Ratio*, metode *Duval's Triangle* ialah metode yang digunakan untuk memperoleh indikasi gangguan berdasarkan komposisi gas hidrokarbon. Metode ini menggunakan tiga jenis gas, yaitu (CH₄), (C₂H₄), dan (C₂H₂). Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh konsentrasi CH₄ sebesar 455,6 ppm, sedangkan C₂H₄ dan C₂H₂ masing-masing sebesar 0 ppm.



Gambar 3. Hasil Pengujian *Duval's Triangle*

Berdasarkan hasil pengujian, CH₄ = 100%, C₂H₄ = 0%, dan C₂H₂ = 0% pada segitiga *Duval Triangle*. Apabila dilihat titik tersebut berada pada zona *Partial Discharge*. Dengan demikian, pola komposisi gas pada sampel menunjukkan adanya indikasi yang mengarah pada zona *Partial Discharge* berdasarkan metode *Duval's Triangle*. Pada analisis ini, metode ini memberikan pendekatan yang berbeda dengan melihat proporsi relatif ke 3 gas hidrokarbon tersebut. Menurut Prasojo et al. (2024)

metode *Duval's Triangle* merupakan salah satu metode diagnostik yang umum digunakan bersama metode *Roger's Ratio* untuk menginterpretasikan gangguan transformator berdasarkan DGA.

Oil Quality

Parameter kualitas minyak transformator juga dievaluasi untuk memantau kondisi minyak itu sendiri. Parameter yang diuji adalah *Breakdown Voltage*, *Water Content*, *Interfacial Tension*, *Acidity*, *Colour*. Hasil pengujian untuk minyak transformator dicatat dan dibandingkan dengan standar IEC 60422 / IEC 60156 yang di mana sebagai standard parameter sebagai berikut (Tanjung & Pancane, 2025; Wijayaningrum et al., 2024).

Hasil pengujian *Oil Quality*, nilai *Health Index Factor* (HIF) dihitung menggunakan metode rata-rata berbobot dengan mempertimbangkan nilai HIF dan bobot (*Weight Index*) dari masing-masing parameter. Parameter yang digunakan meliputi *Breakdown Voltage* (BDV), *Water Content*, *Interfacial Tension* (IFT), *Acidity*, dan *Colour*.

Yang pertama melakukan perhitungan nilai HI setiap parameter yang akan dikonversi ke kategori A-E lalu dikonversi lagi ke *HIF_j* menggunakan rumus berikut :

$$HI = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (9)$$

Setelah mengkonversi nilai hasil perhitungan, Selanjutnya akan melakukan perhitungan *HIF* keseluruhan menggunakan rumus berikut :

$$HIF_{Oil} = \frac{\sum_{i=1}^n (HIF_j \cdot W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} 100\% = \frac{(1.3) + (0.4) + (4.2) + (3.1) + (4.2)}{3 + 4 + 2 + 1 + 2} 100\% \quad (10)$$

$$HIF_{Oil} = \frac{26}{12} 100\% = 1,83 \quad (11)$$

Tabel 8. Hasil Pengujian Kualitas Minyak

<i>Oil Quality</i>	Hasil Pengujian	Skor (<i>S_i</i>)	Bobot (<i>W_i</i>)	Kategori (A/B/C/D/E)	<i>HIF_j</i>
<i>Breakdown Voltage</i>	25 kV	4	3	D	1
<i>Water Content</i>	40,4 ppm	4	4	E	0
<i>Interfacial Tension</i>	35,1 Dyne/cm	1	2	A	4
<i>Acidity</i>	0,12 Mg KOH/g	2	1	B	3
<i>Colour</i>	1	1	2	A	4
Hasil <i>HIF_{Oil}</i>			1,83		

Berdasarkan hasil pengujian *Oil Quality*, diperoleh nilai *Breakdown Voltage* sebesar 25 kV, *Water Content* sebesar 40,4 ppm, IFT sebesar 35,1 dyne/cm, *Acidity* sebesar 0,12 mg KOH/g, dan *Colour* sebesar 1. Berdasarkan kriteria penilaian yang digunakan, BDV memperoleh skor (*S_i*) 4 dengan kategori D, *Water Content* memperoleh skor 4 dengan kategori E, IFT memperoleh skor 1 dengan kategori A, *Acidity* memperoleh skor 3 dengan kategori B, sedangkan *Colour* memperoleh skor 1 dengan kategori A.

Perhitungan dilakukan dengan mengkalikan nilai HIF masing-masing parameter dengan bobotnya, kemudian seluruh hasil perkalian dijumlahkan dan dibagi dengan total bobot. Dari data yang digunakan, Hasil akhir *HIF_{Oil}* adalah 1,83. Hasil penilaian tersebut selanjutnya digunakan dalam perhitungan indeks kondisi *Oil Quality* sebagai salah satu komponen dalam penentuan *Health Index* transformator sebagai berikut:

Furan

Pengujian *Furan* dilakukan untuk memperoleh informasi kondisi isolasi kertas transformator. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah konsentrasi 2-FAL (2-Furaldehyde) yang terlarut dalam minyak (Rosma et al., 2025; Setyawan et al., 2026).

Hasil pengujian 2-FAL dibandingkan dengan kriteria penilaian *Furan* pada Tabel 3. Hasil tersebut kemudian dikonversi menjadi kategori kondisi dan *Health Index Factor* (HIF).

Tabel 9. Hasil Analisis *Furan*

Parameter	Hasil Pengujian	Satuan	Rating Kondisi	<i>HIF_j</i>
2-FAL	75,40	ppb	A	4

Berdasarkan Tabel 9, diperoleh konsentrasi 2-FAL sebesar 75,40 ppb. Berdasarkan kriteria yang digunakan, nilai tersebut termasuk kategori A dengan kondisi bagus, sehingga memperoleh nilai *HIF_j* sebesar 4. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi isolasi kertas berdasarkan parameter *Furan* berada dalam kondisi yang baik.

Hasil Perhitungan *Health Index*

Parameter-parameter yang telah dianalisis seperti hasil dari *Dissolved Gas Analysis*, *Oil Quality*, dan *Furan* dikonversikan menjadi *Health Index Factor* (*HIF_j*). Konversi dilakukan berdasarkan kategori A-E dengan HIF masing-masing sebesar 4,3,2,1, dan 0. Untuk memperoleh nilai *HIF_j* pada kelompok DGA dan *Oil Quality*, digunakan rata-rata berbobot berdasarkan nilai *W_i* masing-

masing parameter. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 10.

Setelah menghitung semua parameter, nilai *Health Index* akhir kemudian dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$HI_{Final} = \frac{\sum_{j=1}^n (HIF_j \times K_j)}{\sum_{j=1}^n (4 \times K_j Total)} \times 100\% = \frac{(3,22 \cdot 10) + (1,83 \cdot 8) + (4,5)}{4 \cdot 23} 100\% \quad (12)$$

$$HI_{Final} = \frac{66,84}{92} 100\% = 72,65 \quad (13)$$

Tabel 10. Hasil Perhitungan *Health Index*

No.	Komponen Parameter	Rating Kondisi	HIF_j	Bobot K_j	$HIF_j \times K_j$
1	<i>Dissolved Gas Analysis</i>	B	3,22	10	32,22
2	<i>Oil Quality</i>	C	1,83	8	14,64
3	<i>Furan (2-FAL)</i>	A	4,00	5	20,00
	Total			23	70,05
HI_{FINAL}			72,65%		

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai *Health Index* akhir sebesar 72,65% yang termasuk dalam kategori Bagus. Nilai tersebut menunjukkan bahwa secara keseluruhan kondisi transformator berdasarkan parameter *Dissolved Gas Analysis*, *Oil Quality*, dan *Furan* masih berada pada kondisi yang baik. Kelompok *Dissolved Gas Analysis* memperoleh nilai *HIF* sebesar 3,22, sedangkan *Oil Quality* memperoleh nilai *HIF* sebesar 1,83 dan *Furan* memperoleh nilai *HIF* sebesar 4,00. Nilai *HIF Oil Quality* yang lebih rendah terutama dipengaruhi oleh kondisi BDV yang berada pada kondisi pada kategori E dan sedangkan *Water Content* yang berada pada kategori yang buruk yaitu E. Meskipun demikian, kondisi isolasi kertas berdasarkan parameter 2-FAL masih berada pada kategori A dengan *HIF* sebesar 4, sehingga memberikan kontribusi positif terhadap nilai *Health Index* secara keseluruhan.

PEMBAHASAN

Analisis Kondisi Berdasarkan *Dissolved Gas Analysis*

Hasil pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA) menunjukkan bahwa sebagian besar parameter gas berada pada kategori A yang dimana semua nilainya nol, sedangkan CH_4 berada pada kategori E dengan nilai 455,6 ppm dan CO_2 berada pada kategori C dengan nilai 1077,2 ppm. Nilai DGA menunjukkan bahwa hampir keseluruhan kondisi berdasarkan parameter gas masih berada pada tingkat yang relatif baik, akan tetapi CO_2 perlu diwaspadai yang dimana dia berada dikategori C. *Methane* yang tinggi

biasanya bentuk dari proses penurunan thermal ringan pada minyak atau kertas isolasi, tingginya rasio CH_4 dibandingkan gas hidrokarbon lainnya menandakan adanya suatu pemanasan suhu yang relatif rendah. Ketiadaan H_2 dan C_2H_2 menunjukkan tidak ada Pelepasan gas akibat percikan api. Artinya, hal ini terjadi karena adanya akumulasi panas lambat yang memecah molekul minyak menjadi CH_4 , sementara oksidasi minyak CO dan CO_2 hanya moderat CO_2 sedang karena kelembapan. Sumber panas bisa berasal dari kerusakan isolator internal atau koneksi longgar namun tanpa percikan besar, sehingga lebih ke arah kerusakan termal tingkat rendah.

Interpretasi CH_4 pada penelitian ini memiliki kesesuaian dengan pedoman DGA yang menggunakan gas hidrokarbon sebagai indikator untuk menilai kemungkinan tekanan termal pada transformator. Namun, pola penelitian ini berbeda dari kondisi yang biasanya ditandai dengan pembentukan C_2H_4 dan C_2H_2 secara bersamaan melalui *Duval's Triangle* seperti menurut Rosma et al. (2025) dan Chairul et al. (2025), karena kedua gas tersebut tidak terdeteksi pada sampel. Perbedaan pola tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi CH_4 tidak dapat digunakan secara tunggal untuk menetapkan jenis gangguan. Dengan demikian, hasil penelitian ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai indikasi adanya proses termal yang perlu dikonfirmasi melalui pemantauan DGA berikutnya dan pemeriksaan kondisi operasi transformator.

Analisis Kondisi DGA Berdasarkan Metode *Roger's Ratio* dan *Duval's Triangle*

Berdasarkan dari hasil kedua metode tersebut, *Duval's Triangle* memberikan indikasi zona gangguan yaitu *Partial Discharge*, sedangkan dengan *Roger's Ratio* tidak dapat memberikan klasifikasi karena nilai rasio yang diperoleh tidak terdefinisi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa hasil analisis DGA tidak seharusnya ditentukan hanya dari satu metode saja. Penggunaan beberapa metode mempunyai keterbatasan dan tidak selalu menghasilkan diagnosis yang sama.

Seperti pada *Roger's Ratio*, dengan kondisi tersebut tidak dapat digunakan untuk menetapkan apakah transformator mengalami gangguan *low-energy discharge*, *high-energy discharge*, maupun gangguan *thermal* berdasarkan 3 rasio tersebut. Tan et al. (2024) menunjukkan bahwa metode rasio memiliki keterbatasan karena diagnosisnya bergantung pada gas-gas yang tersedia dan rasio yang dapat dihitung. Tidak mampunya *Roger's Ratio* untuk memberikan klasifikasi pada data penelitian bukan berarti DGA tidak dapat analisis. Sebaliknya kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemilihan

metode interpretasi harus dapat mempertimbangkan karakteristik data gas yang diperoleh. Pada penelitian ini

Sedangkan pada *Duval's Triangle*, titik pengujian berada pada zona *Partial Discharge*. Hal ini karena *Duval's Triangle* hanya menggunakan CH₄, C₂H₄, dan C₂H₂, sedangkan (H₂) yang juga merupakan bagian penting dalam interpretasi gangguan listrik tidak digunakan sebagai koordinat pada metode tersebut. Pada data penelitian, H₂ tercatat sebesar 0 ppm. Selain itu hasil yang diperoleh hanya dapat menunjukkan perkembangan gas terhadap waktu. Oleh karena itu, indikasi zona *Partial Discharge* lebih tepat digunakan sebagai informasi diagnostik awal yang perlu dikonfirmasi melalui DGA secara berkala dan pemeriksaan parameter operasi transformator lainnya. Pendekatan tersebut sejalan dengan standard IEC 60599 yang menekankan bahwa hasil interpretasi gas merupakan panduan dalam menentukan tindakan dan tetap membutuhkan pertimbangan teknis.

Analisis Kondisi Oil Quality

Hasil pengujian *Oil Quality* menunjukkan adanya perbedaan kondisi antar parameter. BDV sebesar 25 kV memperoleh skor 4 dengan kategori D dan *Water Content* sebesar 40,4 ppm memperoleh skor 4 dengan kategori E yang dimana berbeda dengan hasil parameter lain yang masih dalam kondisi bagus. Kondisi tersebut menghasilkan nilai HIF *Oil Quality* yang buruk, yang dimana merupakan nilai terendah dibandingkan kelompok DGA dan *Furan*. Dengan demikian, berdasarkan metode pembobotan yang digunakan, kelompok *Oil Quality* menjadi komponen yang paling menurunkan nilai *Health Index*. Secara teknis, tingginya *Water Content* sebesar 40,4 ppm dapat menjadi faktor penting yang mempunyai indikasi hubungan dengan *Breakdown Voltage* (BDV) sebesar 25 kV. Menurut Zhou et al. (2024) dan Yuan et al. (2021) Air yang terdapat dalam sistem isolasi minyak-kertas memiliki sifat yang lebih mudah terpolarisasi dibandingkan minyak isolasi, sehingga keberadaannya dapat meningkatkan konduktivitas dan mempermudah terbentuknya jalur konduktif ketika minyak diberikan medan listrik.

Selain itu, kelembapan dapat terakumulasi pada daerah tertentu di dalam sistem isolasi dan meningkatkan ketidakseragaman medan listrik, sehingga kemampuan minyak untuk menahan tegangan sebelum terjadi tembus listrik menjadi lebih rendah. Literatur mengenai pengujian cairan isolasi juga menunjukkan bahwa tegangan tembus minyak sangat dipengaruhi oleh keberadaan kontaminan, termasuk air yang tersuspensi dalam minyak. Oleh karena itu, berdasarkan hasil penelitian ini, pengendalian kandungan air menjadi salah satu aspek penting dalam mempertahankan kondisi minyak transformator.

Analisis Kondisi Isolasi Kertas Berdasarkan Furan

Hasil pengujian *Furan* menunjukkan konsentrasi 2-FAL sebesar 75,40 ppb dan berdasarkan kriteria penelitian termasuk kategori Bagus. Nilai tersebut menunjukkan bahwa parameter *Furan* memberikan gambaran kondisi yang baik pada isolasi kertas berdasarkan kriteria yang digunakan. Analisis *Furan* digunakan untuk memperoleh informasi mengenai tingkat degradasi isolasi kertas, sehingga parameter ini menjadi pelengkap bagi DGA dan pengujian kualitas minyak dalam evaluasi kondisi transformator. Dalam perhitungan *Health Index*, nilai kondisi *Furan* memberikan kontribusi positif terhadap nilai akhir HI. Meskipun demikian, hasil *Furan* pada penelitian ini merupakan hasil pengujian pada satu kondisi pengambilan sampel, sehingga evaluasi perubahan kondisi isolasi kertas akan lebih informatif apabila dilakukan melalui pemantauan nilai *Furan* secara berkala.

Analisis Health Index Transformator

Hasil perhitungan menunjukkan nilai *Health Index* akhir sebesar 72,65% dan berdasarkan klasifikasi yang digunakan dalam penelitian termasuk kategori Bagus yang dimana hanya Penurunan yang signifikan pada kondisi komponen dan perlu dilakukannya pemeliharaan secara berkala. Nilai tersebut diperoleh dari integrasi tiga kelompok parameter, yaitu DGA, *Oil Quality*, dan *Furan*. Dari Pendekatan *Health Index*, memungkinkan beberapa parameter kondisi transformator digabungkan menjadi satu indikator kondisi sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kondisi aset secara menyeluruh. Pendekatan serupa juga digunakan dalam penelitian terkait evaluasi kondisi transformator yang mengintegrasikan beberapa parameter minyak dan DGA dalam penentuan *Health Index*.

Implikasi terhadap Pemeliharaan Transformator

Berdasarkan hasil keseluruhan, kondisi transformator masih berada pada kategori Bagus menurut kriteria penelitian, tetapi terdapat parameter tertentu yang perlu mendapat perhatian. Parameter utama yang perlu diprioritaskan adalah *Water Content* sebesar 40,4 ppm dan BDV sebesar 25 kV yang dimana memiliki kondisi yang buruk. Oleh karena itu, tindakan pemeliharaan dapat diarahkan pada pengendalian kelembapan dan pemulihan kualitas minyak sesuai prosedur pemeliharaan yang berlaku seperti melakukan filterisasi pada minyak transformator.

Selain itu, pemantauan DGA dan *Furan* secara berkala diperlukan untuk melihat perubahan kondisi dari waktu ke waktu. Analisis minyak memang dapat digunakan untuk mengidentifikasi indikasi masalah sebelum berkembang

menjadi kegagalan sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis kondisi. Dengan demikian, hasil *Health Index* dalam penelitian ini tidak hanya menunjukkan kondisi keseluruhan transformator, tetapi juga membantu mengidentifikasi parameter yang perlu menjadi prioritas dalam kegiatan pemantauan dan pemeliharaan.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi transformator berdasarkan metode *Health Index* berada pada kategori Bagus. Kondisi DGA dan *Furan* masih dalam keadaan stabil, akan tetapi perlu diperhatikan pada DGA, karena diagnosis metode *Duval's Triangle* mengidentifikasi adanya indikasi gangguan pada zona *Partial Discharge* di DGA yang dimana bisa terjadi terbentuknya gas-gas spesifik akibat degradasi isolasi yang menjadi tanda awal kerusakan internal sebelum terjadi kegagalan total, sedangkan kelompok *Oil Quality* memiliki beberapa parameter yang perlu diperhatikan seperti BDV dan *Water Content*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa evaluasi tidak cukup dilakukan hanya berdasarkan nilai HI akhir, tetapi juga perlu memperhatikan parameter penyusunnya. Dalam penelitian ini, BDV dan *Water Content* menjadi parameter yang paling perlu diperhatikan, sedangkan hasil *Furan* menunjukkan kondisi isolasi kertas yang baik berdasarkan kriteria yang digunakan. Oleh karena itu, pemantauan berkala terhadap DGA, *Oil Quality*, dan *Furan* diperlukan untuk mengetahui perkembangan kondisi transformator dan mendukung penerapan pemeliharaan transformator.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kondisi minyak transformator menggunakan metode *Health Index* yang mengintegrasikan parameter *Dissolved Gas Analysis* (DGA), *Oil Quality*, dan *Furan*, diperoleh nilai *Health Index* akhir sebesar 72,65% yang termasuk dalam kategori Bagus. Hasil analisis DGA menghasilkan nilai HIF sebesar 3,22, sedangkan *Oil Quality* menghasilkan HIF sebesar 1,83 dan parameter *Furan* sebesar 4,00. Nilai HIF *Oil Quality* yang lebih rendah terutama dipengaruhi oleh *Breakdown Voltage* sebesar 25 kV dan *Water Content* sebesar 40,4 ppm yang masing-masing berada pada kategori yang buruk. Sementara itu, hasil pengujian 2-FAL sebesar 75,40 ppb berada pada kategori bagus dengan HIF sebesar 4,00.

Kondisi transformator secara keseluruhan masih berada pada kategori Bagus, akan tetapi parameter kualitas minyak, khususnya BDV dan *Water Content* dimana kondisinya yang buruk dan perlu adanya penanganan, oleh karena itu perlu menjadi perhatian penting dalam kegiatan pemantauan dan pemeliharaan yang khusus. Pemantauan

DGA, kualitas minyak, dan *Furan* secara berkala diperlukan untuk mengetahui perubahan kondisi transformator sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan berdasarkan perkembangan kondisi aktual transformator.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar pemantauan kondisi minyak transformator dilakukan secara berkala, terutama pada parameter *Breakdown Voltage* (BDV) dan *Water Content* yang menunjukkan kondisi paling perlu diperhatikan. Apabila hasil pengujian menunjukkan peningkatan kandungan air dan penurunan nilai BDV, tindakan pemeliharaan dapat dilakukan melalui *oil purification* atau *oil filtration* untuk mengurangi kandungan air dan kontaminan dalam minyak, kemudian dilanjutkan dengan pengujian ulang BDV dan *Water Content* untuk mengevaluasi efektivitas proses tersebut.

Pengujian DGA dan *Furan* juga perlu dilakukan secara berkala untuk memantau perubahan kondisi gas terlarut dan degradasi isolasi kertas, selain itu juga diagnosis *Duval's Triangle* pada DGA merujuk pada zona gangguan *Partial Discharge* yang perlu diwaspadai. Selain itu, apabila hasil pengujian menunjukkan kecenderungan penurunan kualitas secara berkelanjutan, hasil *Health Index* dapat digunakan sebagai salah satu dasar dalam menentukan prioritas inspeksi dan tindakan pemeliharaan transformator. Untuk penelitian selanjutnya, analisis dapat dikembangkan menggunakan data pengujian dari beberapa periode sebelum dan sesudah tindakan *oil purification* atau *oil treatment*, sehingga perubahan nilai *Health Index*, BDV, *Water Content*, DGA, dan *Furan* dapat dianalisis secara lebih komprehensif serta efektivitas tindakan pemeliharaan dapat dievaluasi secara kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfirdaus, Muh. R., Saini, M., & Sonong. (2026). Analisis Perbandingan Tegangan Tembus Antara Minyak Terpurifikasi dan Non Terpurifikasi Pada Transformator Unit 1 PLTA MALEA 2x45 MW. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 24(1), 137–144. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v24i1.5091>
- Ali, M., & Kriska, F. (2024). Analisis dan Evaluasi Kondisi Oli Transformator Berdasar Pengujian DGA dan BDV. *Aviation Electronics, Information Technology, Telecommunications, Electricals, and Controls (AVITEC)*, 6(2), 111. <https://doi.org/10.28989/avitec.v6i2.2170>
- Badawi, M., Ibrahim, S. A., Mansour, D. E. A., El-Faraskoury, A. A., Ward, S. A., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2022). Reliable Estimation for Health Index of Transformer Oil Based on Novel Combined Predictive Maintenance

- Techniques. *IEEE Access*, 10, 25954–25972. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3156102>
- Budhihadi, R. P., & Sudiarto, B. (2024). Analysis of Transformer Oil Condition of Dissolved Gas Analysis (DGA) Testing Results with Modified Conventional Methods. *International Journal of Electrical, Computer, and Biomedical Engineering*, 2(4). <https://doi.org/10.62146/ijecbe.v2i4.72>
- Chairul, I. S., Ghani, S. A., Kamaruddin, F. N., & Azam, N. S. A. (2025). In-Service Distribution Transformer Health Index: Insights from Field Data. *Journal of Power and Energy Engineering*, 13(09), 176–185. <https://doi.org/10.4236/jpee.2025.139012>
- Hidayana, D. K., Ridlwan, H. M., Candra, M., Studi Teknologi Rekayasa Konversi Energi, P., Teknik Mesin, J., Negeri Jakarta, P., & A Siwabessy, J. G. (2024). *Penerapan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dalam Menentukan Bobot Faktor pada Transformers Health Index*. <http://prosiding.pnj.ac.id>
- Kurniawan, A., Rahmawati, Y., & Putranto, H. (2023). Studi Performa Transformator Daya Menggunakan Metode Health Index di Gardu Induk Waru Sidoarjo. *SinarFe7 : Seminar Nasional Fortei Regional 7*, 33–38.
- Mustafa, E., Ahmad, B., Ali, M. I., Afia, R. S. A., & Ullah, R. (2024). Degradation Assessment of In-Service Transformer Oil Based on Electrical and Chemical Properties. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/app142411767>
- Park, K. H., Park, S. H., Hwang, C. S., & Youn, Y. W. (2026). Experimental Analysis of Electrical Degradation in Eco-Friendly Insulating Oil Using a Scaled-Down Transformer Internal Structure. *IEEE Access*, 14, 83434–83444. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3698209>
- Prasojo, R. A., Putra, M. A. A., Azizi, H. F. W., Hakim, M. F., Kurniawan, I., & Suwarno. (2024). Optimizing Fault Detection in High-Voltage Power Transformers: A Comparative Study of Multi-Method Analysis. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 16(2), 149–161. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2024.16.2.1>
- Rohmadoni, M., & Perdana, D. (2026). Analisis Keandalan Power Transformer Berdasarkan Metode Preventive Maintenance menggunakan Thermovision dan Dissolved Gas Analysis pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro Dan Informatika*, 4(5), 87–100. <https://doi.org/10.61132/jupiter.v4i5.1565>
- Rosma, I. H., Ihsan, B., & Pikri, J. (2025). TRANSFORMER HEALTH CONDITION ANALYSIS BASED ON HEALTH INDEX AND FAILURE METHOD. *TESLA: JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 27(2), 121–131. <https://doi.org/10.24912/tesla>
- Setyawan, W., Pambudi, W. S., Munir, M., Suheta, T., Prabowo, Y. A., Kunci-Ann, K., Daya, P., & Umur, D. (2026). Analisa Kondisi Dan Prediksi Umur Transformator Daya Menggunakan Metode Health Index Berbasis Artificial Neural Network (ANN). *Jurnal Teknologi Elektro*, 17(01), 1–8. <https://doi.org/10.22441/jte.2026.v17i1.001>
- Siregar, F. H. M., Sembiring, D. W., Simbolon, B., Hutajulu, O. Y., & Sinaga, D. J. (2025). Pengujian Tegangan Tembus Minyak Trafo Distribusi 20 KV Di PT. Charoen Pokhand. *Jurnal Ilmiah Penelitian Mahasiswa*, 3(6), 248–256. <https://doi.org/10.61722/jipm.v3i6.1639>
- Tamma, W. R., Prasojo, R. A., & Suwarno. (2021). High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate. *High Voltage*, 6(2), 314–327. <https://doi.org/10.1049/hve2.12074>
- Tan, J. P., Jueco, J. C., & Tan, E. M. (2024). Performance Analysis of Multiple Machine Learning Models Applied to Dissolved Gas Analysis under Thermal Fault Classification Considering IEEE C57.104-2019TM Standard for Substation Transformer. *FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*, 83–88.
- Tanjung, I. G. L. C., & Pancane, I. W. D. (2025). Analisis Pengaruh Purifikasi Oli Transformator terhadap Tegangan Tembus Oli Tranformator. *Jupiter: Publikasi Ilmu Keteknikan Industri, Teknik Elektro Dan Informatika*, 3(5), 63–77. <https://doi.org/10.61132/jupiter.v3i5.1061>
- Wijayaningrum, V. N., Abdillah, M. N., & Abdullah, M. Z. (2024). Enhancing Power Transformer Oil Quality Weight Factor using A Genetic Algorithm. *Jurnal ELTIKOM : Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi Dan Komputer*, 8(1), 34–43. <https://doi.org/10.31961/eltikom.v8i1.1052>
- Yuan, Q., Qi, B., Zhao, J., Gao, C., Yang, X., Zhang, S., & Li, C. (2021). Effect of DC electric field on moisture migration characteristics in oil-pressboard. *High Voltage*, 6(4), 647–654. <https://doi.org/10.1049/hve2.12085>
- Zhou, J., Wu, Z., Guo, Y., Zhang, R., Zhu, W., & Zhang, Q. (2024). Model moisture transport in oil-paper insulation of transformer: Theory and experiment. *High Voltage*, 9(4), 879–887. <https://doi.org/10.1049/hve2.12414>