

# Implementasi Metode *Scoring Matrix* dalam Menentukan Indeks Kondisi Minyak Isolasi pada Transformator Daya 150 kV

Rahman Azis Prasajo<sup>a)</sup>, Liska Safarina<sup>a)</sup>, Agung Fiqh Paramonta Islam<sup>a)</sup>, Rohmanita Duanaputri<sup>a)</sup>, Mochammad Mieftah<sup>a)</sup>, Eko Yulianto<sup>b)</sup>

**Abstract:** Transformers are critical equipment in electrical power system which assist in transmitting electrical energy from generators to consumers. Oil insulation is one of the key component in power transformer. Poor quality of oil insulation can be fatal to the transformer, especially when a disturbance occurs. Oil insulation can affect the aging of power transformers and the failure can disturb the continuity of electrical energy supplied to consumers. There are three things that affect the condition of transformer oil insulation, namely chemical, electrical, and physical. The test results of oil insulation parameters that were collected was assessed individually, such as Interfacial Tension (IFT), colour, breakdown voltage (BDV), acidity, and water content. Then, the condition assessment of power transformer oil insulation using a scoring matrix method proposed in CIGRE TB 761 was performed to determine the assessment index of oil insulation conditions of two 150 kV power transformers based on the results of various oil testing. Lastly, recommended action is provided based on the analysis.

**Keywords:** Transformer Assessment Index, Oil Insulation, Condition Monitoring and Diagnosis, Scoring matrix, Trafo

## 1. Pendahuluan

Energi listrik adalah komoditas penting bagi kelangsungan hidup ekonomi. Hal tersebut menjadi alasan untuk meningkatkan produksi listrik [1]. Untuk menjaga kontinuitas energi listrik agar tersalur ke konsumen maka seluruh peralatan harus dijaga agar dapat beroperasi dengan baik. Salah satu peralatan yang cukup sentral dan kritis yang harus dilindungi yaitu transformator [2]. Transformator merupakan suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik berdasarkan prinsip-prinsip induksi electromagnet [3]. Untuk melindungi transformator agar dapat beroperasi dengan aman diperlukan isolasi minyak transformator dengan kualitas baik. Seiring beroperasinya transformator, isolasi minyak juga akan mengalami penuaan yang dapat mengakibatkan kerusakan pada transformator [4]. ketika transformator rusak, maka akan membutuhkan waktu yang lama untuk memperbaikinya dan biaya yang tinggi untuk menggantinya [5]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kondisi isolasi minyak transformator harus di evaluasi secara komprehensif untuk mencegah kegagalan mendadak. Terdapat tiga hal mempengaruhi kondisi isolasi minyak transformator yaitu dari segi kimia, elektrik, dan fisik. Dari segi kimia dapat dilakukan pengujian *acidity* dan *water content*. Dari segi elektrik dapat dilakukan pengujian *breakdown voltage*. Segi fisik dapat dilakukan pengujian *color* dan *interfacial tension* minyak [6].

Berdasarkan hasil penelitian-penelitian sebelumnya, isolasi minyak transformator memiliki penilaian yang berbeda-beda tiap parameter yang mana memunculkan kesimpulan atau pemahaman yang berbeda pula terhadap kondisi transformator [7][2]. Eksperimen lain menganalisis sifat-sifat minyak isolasi yang mana sebagian besar dari mereka melaporkan bahwa keasaman memiliki dampak terhadap usia transformator [8]. IFT ditemukan sebagai indikator lain yang efektif untuk mengidentifikasi degradasi minyak isolasi dan keasaman yang akan meningkat

seiring dengan meningkatnya oksidasi dalam minyak [8]. Eksperimen dan analisis lain tentang karakteristik isolasi minyak transformator telah dilakukan di penelitian [9][10].

Artikel ini akan mengimplementasikan *scoring matrix* untuk mendapatkan *Assessment Index* isolasi minyak transformator. Dengan menggunakan metode *scoring matrix*, dapat didapatkan satu nilai kondisi minyak transformator berdasarkan berbagai parameter uji isolasi minyak transformator. Batas dari parameter-parameter isolasi minyak telah diusulkan pada CIGRE 761(2019). Ketika besaran hasil parameter uji mencapai batas yang telah ditentukan, peringatan dan tindakan untuk mencegah kegagalan isolasi minyak transformator dapat diusulkan [11]. Diagnosis kondisi transformator menggunakan metode *scoring matrix* diharapkan mampu memberikan jawaban atas kondisi minyak transformator secara aktual. Artikel ini juga akan membahas rekomendasi penanganan isolasi minyak transformator berdasarkan hasil perhitungan metode *scoring matrix* sehingga dapat membantu manajer aset dalam penentuan tindakan yang tepat pada transformator tersebut.

## 2. Metodologi

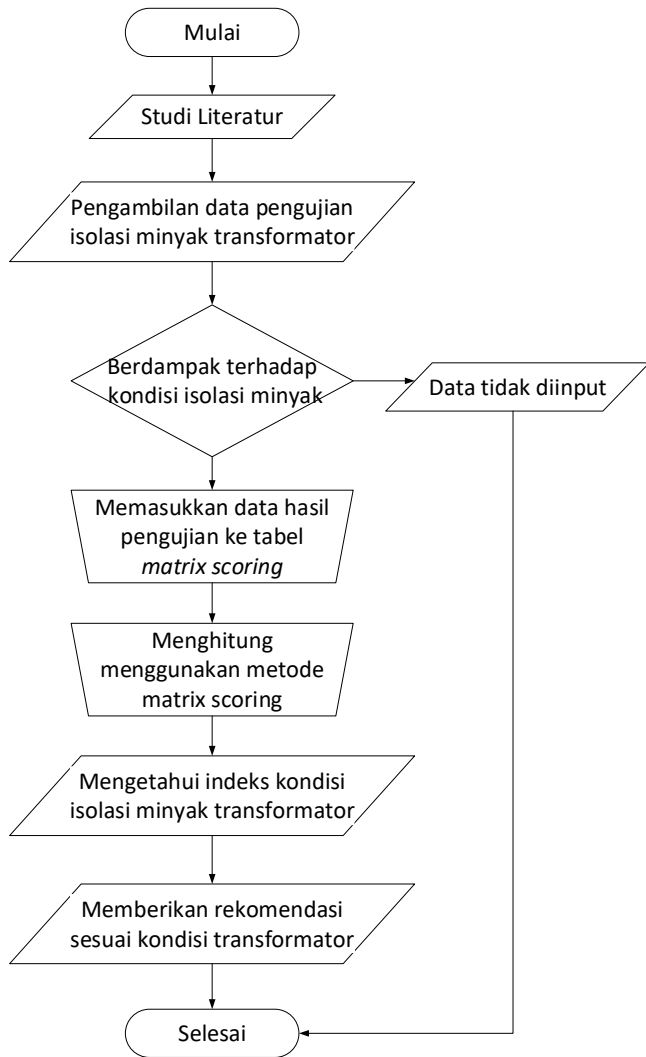
### 2.1. Flowchart

Gambar 1 menunjukkan *flowchart* dari penelitian ini. Dimulai dari studi literatur tentang metode yang dilakukan dengan cara mencari referensi berupa jurnal, standard, atau artikel ilmiah yang relevan dengan permasalahan untuk dijadikan sebagai landasan dari penelitian. Selanjutnya adalah pengambilan data hasil pengujian isolasi minyak pada transformator. Kemudian dilakukan analisis dampak parameter yang dapat digunakan untuk menilai kondisi isolasi minyak pada transformator yaitu: IFT, *Color*, *Brekdown voltage*, *Water content*, dan *Acidity*. Kemudian data hasil pengujian dimasukkan ke tabel *scoring* dari CIGRE 761 (2019). Selanjutnya dilakukan perhitungan *scoring matrix* yang terdiri dari *scoring*, *weighting*, dan *aggregation*. Selanjutnya indeks kondisi minyak didapatkan berdasarkan agregasi dari score yang didapatkan. Selanjutnya memberikan rekomendasi sesuai dengan kondisi transformator berdasarkan penilaian kondisi isolasi minyak transformator sesuai dengan *recommended action* CIGRE 761 (2019), IEC 60422 (2014), dan hasil penelitian lainnya.

\* Korespondensi: [rahmanazisp@polinema.ac.id](mailto:rahmanazisp@polinema.ac.id)

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Polinema.  
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang 65141

b) Divisi Transmisi Kalsulmapana, PT. PLN (Persero) Kantor Pusat.  
Jalan Trunojoyo Blok M – I No 135 Kebayoran Baru, Jakarta 12160



Gambar 1 Flowchart Penilaian Isolasi Minyak menggunakan Metode Scoring Matrix

### 2.2. Scoring Matrix

Metode *scoring matrix* merupakan metode yang dapat digunakan untuk menilai kondisi transformator dengan mengubah data penilaian yang terkait dengan masing-masing mekanisme kegagalan untuk diubah menjadi salah satu dari enam level (hijau, kuning, oranye, merah muda, merah, hitam) [12]. Metode *scoring matrix* menginterpretasikan pengujian lapangan atau laboratorium menjadi sebuah angka penilaian yang hasilnya menggambarkan kondisi isolasi minyak transformator. Selain itu, hasil dari metode *scoring matrix* berbeda dari hasil uji pemeliharaan atau diagnosis berbasis kondisi, yang menekankan pada pencarian kerusakan dan ketidakefisienan yang membutuhkan perbaikan untuk menjaga agar trafo tetap beroperasi dalam selang waktu tertentu [13]. Pada metode *scoring matrix*, setelah dilakukan pengklasifikasian tiap-tiap parameter pada hasil pengujian transformator dilakukan *scoring* pada tiap-tiap parameter sesuai dengan tabel 1 yang selanjutnya akan dilakukan *weighting* (pembobotan) dan *aggregation*. Tujuan penilaian isolasi minyak menggunakan metode *scoring matrix* adalah utamanya memudahkan dalam mengurutkan sekumpulan transformator

berdasarkan indeks kondisi yang didapatkan dari banyak parameter uji. Sehingga, dengan mudah diidentifikasi transformator mana yang perlu diperhatikan terlebih dahulu.

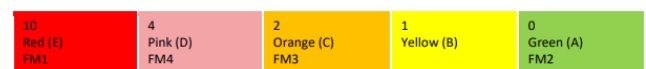
#### 2.2.1 Scoring

Sistem *scoring* digunakan untuk mengkategorikan kondisi isolasi minyak transformator ke dalam beberapa level. Tingkat skor ditentukan dengan menggunakan batas yang disesuaikan dengan standar internasional yaitu CIGRE 761 (2019). Pada literatur tersebut kondisi isolasi minyak digolongkan dengan indikator huruf yaitu A, B, C, D, E dan F. Kondisi A untuk kondisi isolasi minyak dalam keadaan baru dan memiliki skor 0, kondisi B untuk kondisi isolasi minyak mengalami beberapa penuaan namun dalam kondisi baik yang memiliki skor 1, kondisi C untuk kondisi dimana isolasi minyak mengalami kondisi penuaan yang signifikan dan diberikan skor 2, kondisi D dimana isolasi minyak harus diganti atau diperbaiki dalam jangka waktu pendek dan diberikan skor 4, kondisi E dimana kondisi isolasi minyak dapat mengalami gangguan yang cukup tinggi dan diberikan skor 10, dan kondisi F dimana kondisi transformator tidak boleh beroperasi sebelum isolasi minyak diperbaiki yang mana kondisi F memiliki skor 20[12].

Parameter yang berpengaruh / tes investigasi	Kelas tegangan dari peralatan	Unit	F	E	D	Referensi
Water content	<72.5	ppm		>40		IEC 60422
	72.5-170			>30		
	>170			>20		
BDV (IEC 60156 2,5 mm)	<72.5	kV		<30		IEC 60422
	72.5-170			<40		
	>170			<50		
Acidity	<72.5	mg KOH/g		>0.30		IEEE C57.106, IEC 60422
	72.5 - 170			>0.20		
	>170			>0.15		
IFT	All	mNm		<22		
Colour (by Lab testing)	All		Coklat tua (5.5 - 8.5)	Kuning sawo (4.0- 5.5)	Kuning terang (2.5-4.0)	IEEE C57.152
Colour (by Visual Inspection)	All		Hitam/hitam tua	Gelap abu keruh	Coklat/ coklat muda	IEC 60422, Table-5

Parameter yang berpengaruh / tes investigasi	Kelas tegangan dari peralatan	Unit	C	B	A	Referensi
Water content	<72.5	ppm	30-40	<30	<20	IEC 60422
	72.5-170		20-30	<20	<10	
	>170		15-20	<15	<10	
BDV (IEC 60156 2,5 mm)	<72.5	kV	30-40	>40	>55	IEC 60422
	72.5-170		40-50	>50	>60	
	>170		50-60	>60	>60	
Acidity	<72.5	mg KOH/g	0.15-0.30	<0.15		IEEE C57.106, IEC 60422
	72.5 - 170		0.10-0.20	<0.10	<= 0.03	
	>170		0.10-0.15			
IFT	All	mNm	22-28	>28	>35	
Colour (by Lab testing)	All		Kuning pucat (1.0-2.5)	Kuning pucat (0.5-1.0)	Bersih (0.0-0.5)	IEEE C57.152
Colour (by Visual Inspection)	All		Kuning /Kuning tua	Kuning muda	Bersih & tanpa kontaminan yang terlihat	IEC 60422, Table-5

Gambar 2 Penilaian Kondisi Isolasi Minyak Transformator [12]



Gambar 3 Scoring pada tiap-tiap parameter[12]

#### 2.2.2 Weighting

Faktor pembobotan (*weighting factor*) digunakan untuk mengurutkan tingkat kepentingan antara kontribusi parameter tertentu yang mempengaruhi kondisi transformator. Faktor pembobotan dapat bervariasi sesuai dengan parameter yang digunakan pada penilaian kondisi isolasi minyak. Pada penelitian kali ini faktor pembobotan akan dianggap 1.

**2.2.3 Aggregation**

Tahap *aggregation* adalah perhitungan dari semua parameter untuk menentukan hasil akhir dari kondisi isolasi minyak transformator sehingga rekomendasi yang sesuai pada kondisi isolasi minyak transformator tersebut dapat diberikan [12]. Berdasarkan CIGRE 761 (2019), terdapat beberapa cara menghitung scoring matrix untuk mendapatkan indikator penuaan isolasi minyak. Pada penelitian kali ini akan digunakan persamaan *weighted-average* yang mana akan diberikan pembobotan pada tiap parameter, setelah itu dirata-rata untuk mendapatkan indeks kondisi isolasi minyak. Berikut merupakan persamaan dengan menggunakan *weighted-average*:

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

SM = Scoring Matrix

S = Nilai parameter Scoring

W= Nilai parameter Weighting

Metode agregasi *weighted-average* ini yang banyak digunakan oleh penelitian terdahulu [7]. Jumlah parameter yang digunakan dinyatakan oleh n. Penilaian skor sebuah parameter dinyatakan dalam Si. Nilai sebuah Si dapat berupa huruf A hingga F, dan diinterpretasikan sebagai angka 0, 1, 2, 4, 10, dan 20. Setiap parameter selain memiliki skor penilaian (Si), memiliki juga nilai *weighting* pada tiap parameter (Wpi). Nilai Wpi tergantung faktor keberpengaruhannya suatu parameter terhadap indeks tersebut. Penilaian setiap parameter akan menghasilkan sebuah indeks minyak yang nantinya akan dikonversikan ke kategori A, B, C, D, E, dan F seperti pada gambar 3 [14].

Tabel 1 Klasifikasi Nilai Indeks Minyak Transformator yang Diusulkan

Indeks minyak	Kategori
0-0.65	A
0.65-1.4	B
1.4-3	C
3-6.4	D
6.4-13.67	E
>13.67	F

**2.3. Recommended Action**

Setelah didapatkan data transformator, terkait parameter-parameter yang digunakan pada penilaian kondisi isolasi minyak transformator maka dapat mengetahui kondisi isolasi minyak transformator tersebut. Pada CIGRE 761 (2019) kondisi isolasi minyak dikategorikan menjadi enam golongan seperti yang dipaparkan pada tabel 2.

Tabel 2 Rekomendasi Penilaian Tiap-Tiap Parameter Berdasarkan Hasil Pengujian Isolasi Minyak Transformator Berdasarkan CIGRE 761(2019) [12]

F	De-energize transformator sesegera mungkin. Jangan mengoperasikan peralatan sebelum diperbaiki.
E	Isolasi minyak dalam kondisi sangat buruk. Kemungkinan kegagalan yang tinggi pada bagian yang aktif atau komponen lainnya dikarenakan kondisi isolasi minyak yang buruk. Penyebab dari degradasi isolasi minyak harus

	diperbaiki. Direkomendasikan dilakukan rekondisi/reclaiming atau penggantian isolasi minyak secepat mungkin.
D	Isolasi minyak dalam kondisi buruk. Penyebab isolasi minyak mengalami degradasi harus segera diperbaiki. Rekondisi/reclaiming atau mengganti cairan isolasi minyak harus dipertimbangkan dalam jangka pendek.
C	kondisi isolasi minyak disertai dengan tanda-tanda degradasi yang signifikan. Disarankan untuk melakukan investigasi terkait penyebab dari degradasi isolasi minyak. Setelah memperbaiki masalah, maka pertimbangkan rekondisi, reklamasi, atau penggantian isolasi minyak.
B	Isolasi minyak dalam kondisi bagus. Beberapa tanda degradasi/kerusakan terlihat jelas. Kurangi interval pengambilan sampel untuk memonitor tingkat kerusakan pada isolasi minyak
A	Tanda-tanda degradasi pada isolasi minyak masih minim. Isolasi minyak seperti kondisi baru

Sedangkan berdasarkan IEC 60422 (2014) kondisi isolasi minyak digolongkan menjadi tiga yaitu baik, cukup, dan buruk seperti yang dijelaskan pada tabel 3.

Tabel 3 Recommended Action Tiap-Tiap Parameter Isolasi Minyak berdasarkan IEC 60422 (2014) [15]

Parameter	Batas-batas pada tindakan yang direkomendasikan			Tindakan yang direkomendasikan
	Baik	cukup	buruk	
Warna dan tampilan	Bersih dan tanpa kontaminasi yang ada		Gelap dan keruh	Seperti yang ditentukan oleh tes lainnya
BDV (kV)	>50	40 - 50	<40	<b>Baik</b> : melanjutkan pengambilan sampel normal <b>Cukup</b> : pengambilan sampel lebih sering. Periksa parameter yang lain, misalkan kandungan air, partikel, dan kadar <i>acidity</i> pada minyak. <b>Buruk</b> : Recondition minyak yaitu proses untuk menghilangkan atau mengurangi kontaminasi fisik dengan cara proses fisik (filtrasi, pengeringan, degassing, dll), atau sebagai alternatif yang lebih ekonomis karena tes lain menunjukkan penuaan yang parah yaitu dengan penggantian atau dengan reclaiming yaitu proses yang dapat menghilangkan atau mengurangi kontaminan polar larut dan tidak larut dari minyak dengan pengolahan kimia dan fisik.
Water Content (mg/kg)	<20	20 sampai 30	>30	<b>Baik</b> : melanjutkan pengambilan sampel normal <b>Cukup</b> : pengambilan sampel lebih sering. Periksa parameter yang lain, misalkan BDV, kandungan partikel pada minyak dan kadar <i>acidity</i> pada isolasi minyak. <b>Buruk</b> : Periksa sumber dari air, rekondisi minyak, atau sebagai alternatif yang lebih ekonomis karena tes lain menunjukkan penuaan yang parah yaitu dengan penggantian atau dengan reclaiming gabungan minyak dengan prosedur pengeringan. Meskipun harus memperhatikan jumlah air yang masih tertahan pada isolasi padat
Acidity (mgKOH/g oil)	<0.10	0,10 sampai 0.20	>0.20	<b>Baik</b> : melanjutkan pengambilan sampel normal <b>Cukup</b> : Pengambilan sampel lebih sering. Periksa adanya sedimen dan lumpur. Minyak yang terhambat hingga mencapai nilai yang cukup besar akan kehilangan untuk melakukan perlindungan oksidasi.

				<b>Buruk</b> : Mulai dari nilai 0,15 keputusan yang direkomendasikan dapat dilakukan untuk reclaim minyak atau sebagai alternatif jika lebih ekonomis dan tes lain menunjukkan penuaan yang parah yaitu dengan mengganti minyak.
IFT (mN/m)	>28 (inhibited) >25 (Uninhibited)	22 -i 28 20 -i 25	<22 <20	<b>Baik</b> : melanjutkan pengambilan sampel normal <b>Cukup</b> : Pengambilan sampel lebih sering <b>Buruk</b> : Periksa keberadaan sendimen dan lumpur

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Pengujian Isolasi Minyak Transformator

Pengujian Isolasi minyak transformator meliputi pengujian fisik, kimia, dan elektrik. Untuk pengujian fisik isolasi minyak, parameter yang digunakan adalah *color scale* dan tegangan antar permukaan (*interfacial tension*). Untuk pengujian kimia pada isolasi minyak, parameter yang digunakan adalah kandungan air (*water content*) dan kadar asam (*acidity*) pada isolasi minyak [6]. Untuk pengujian elektrik pada isolasi minyak transformator, parameter yang digunakan adalah tegangan tembus (*breakdown voltage*). Hasil pengujian isolasi minyak transformator pada tabel 4 merupakan hasil pengujian transformator yang berada di Gardu Induk Sekarputih Mojokerto yang dilakukan pada tahun 2021 dan 2022.

Tabel 4 Hasil Pengujian Isolasi Minyak Transformator [16]

Kode Trafo	Teg. Primer	Daya (MVA)	Water Content (ppm)	BDV (Kv)	Acidity (mg KOH/g)	IFT (mN/m)	Color	Usia (tahun)
IBT 5	150	100	4.80	84.53	0.0230	28.20	<0.5	5
TRF 6	150	60	7.28	59.60	0.0665	33.10	0.8	6

#### 3.2 Penilaian Tiap-tiap Parameter Hasil Pengujian Isolasi Minyak Berdasarkan CIGRE 761 (2019), IEC 60422 (2014), dan Penelitian sebelumnya

Dari hasil pengujian kondisi isolasi minyak pada tabel 4 di atas dapat dianalisis terkait tiap-tiap parameter pengujian isolasi minyak transformator berdasarkan CIGRE 761 (2019), IEC 60422 (2014), dan penelitian-penelitian sebelumnya yang terkait.

Kadar *water content* pada isolasi minyak IBT 5 dan TRF 6 termasuk dalam kategori skor A berdasarkan CIGRE 761, dan dinilai masih dalam kondisi baru karena tanda-tanda degradasi pada minyak masih minim [12]. Menurut IEC 60422 (2014), kondisi minyak IBT 5 dan TRF 6 dalam kondisi baik sehingga direkomendasikan melanjutkan pengambilan sampel secara normal. Penelitian sebelumnya juga menyebutkan bahwa *water content* pada hasil pengujian minyak memiliki korelasi terkecil dibandingkan parameter isolasi minyak lainnya dengan umur transformator [17]. Meskipun begitu, nilai *water content* IBT 5 dan IBT 6 harus selalu diperhatikan karena kadar air dalam isolasi minyak semakin lama akan meningkat [15].

Pada tabel 4 juga dianalisis bahwa *breakdown voltage* pada isolasi minyak IBT 5 menurut CIGRE 761 (2019) memiliki skor A [12]. Nilai BDV pada isolasi minyak IBT 5 menunjukkan hanya sedikit kontaminan elektrik konduktif yang tercampur dalam minyak dan mengindikasikan isolasi minyak masih berkondisi baik [15]. Sedangkan besar *breakdown voltage* pada isolasi minyak TRF 6 tergolong skor B. Sedangkan berdasarkan IEC 60422 (2014) besar BDV IBT 5 dan TRF 6 tergolong dalam kondisi baik dan direkomendasikan melanjutkan pengambilan sampel secara normal karena minyak masih belum terkontaminasi elektrik konduktif dalam jumlah besar [15].

Kadar *acidity* pada isolasi minyak IBT 5 dan TRF 6 juga memiliki skor yang berbeda menurut CIGRE 761 (2019). IBT 5 memiliki skor A yang menunjukkan tidak banyak mengandung kontaminan. Sedangkan, kadar *acidity* pada minyak TRF 6 memiliki skor B dan dinilai memiliki beberapa tanda degradasi atau kerusakan yang terlihat jelas. Kadar asam yang lebih tinggi pada minyak TRF 6 menunjukkan bahwa minyak teroksidasi atau terkontaminasi dengan bahan seperti pernis, cat, atau benda asing lainnya [18]. Kadar *acidity* pada isolasi minyak transformator ini dapat dijadikan sebagai indikator terbaik penuaan pada isolasi minyak karena memiliki korelasi yang tinggi dengan usia transformator [17]. Kadar *acidity* juga dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan kapan minyak harus diganti atau direklamasi [15].

Dari tabel 4 juga dapat dianalisis bahwa parameter *interfacial tension* pada isolasi minyak IBT 5 dan TRF 6 dapat digolongkan dalam skor B dan dinilai masih dalam kondisi bagus tetapi beberapa tanda degradasi/kerusakan terlihat jelas. Sehingga pada IBT 5 dan TRF 6 diperlukan pemantauan lebih lanjut untuk mengetahui tingkat kerusakan pada isolasi minyak [12]. Terjadinya awal mula degradasi pada isolasi minyak IBT 5 dan TRF 6 bisa terjadi dikarenakan adanya kontaminasi polar terlarut di dalam minyak. Menurunnya nilai IFT ini mengindikasikan minyak transformator semakin buruk [17]. Penurunan IFT yang cepat juga dapat menjadi indikasi masalah kompatibilitas antara minyak dan beberapa bahan transformator seperti pernis, gasket, atau kontaminasi yang tidak disengaja saat mengisi minyak pada transformator [15]. Besar IFT pada isolasi minyak transformator tersebut dapat dijadikan sebagai indikator penuaan pada isolasi minyak karena memiliki korelasi yang tinggi dengan usia transformator [17]. Semakin lama usia transformator maka kecenderungannya nilai IFT semakin menurun. Sedangkan, berdasarkan IEC 60422 (2014) besar IFT pada isolasi minyak IBT 5 dan TRF 6 masih dalam kondisi baik dan direkomendasikan melanjutkan pengambilan sampel secara normal.

Sedangkan, *color* pada isolasi minyak IBT 5 berdasarkan CIGRE 761 (2019) termasuk kategori A. Kondisi tersebut juga menunjukkan bahwa kontaminasi pada minyak IBT 5 masih minim. Sedangkan *color* pada isolasi minyak TRF 6 menurut CIGRE 761

(2019) tergolong dalam kategori B yang menjadi indikasi mulai terdapat degradasi atau kontaminasi pada minyak seperti partikel, air, gas, dan lain-lain. *Color* pada isolasi minyak transformator dapat dijadikan sebagai indikator terbaik penuaan pada isolasi minyak karena memiliki korelasi yang tinggi dengan usia transformator[17]. Sedangkan berdasarkan IEC 60422 (2014) isolasi minyak pada IBT 5 dan TRF 6 tergolong dalam kategori baik sehingga direkomendasikan melanjutkan pengambilan sampel secara normal pada isolasi minyak[15].

### 3.3 Kondisi Isolasi Minyak Transformator berdasarkan hasil Perhitungan Scoring Matrix CIGRE 761 (2019)

Sub-bab 3.2 telah membahas kedua transformator berdasarkan masing-masing parameter uji minyak. Selanjutnya, dilakukan analisis untuk mendapatkan satu indeks minyak untuk masing-masing transformator berdasarkan lima pengujian minyak, yaitu *Water Content*, *Breakdown Voltage*, *Interfacial Tension*, dan *Color*. Berdasarkan hasil pengujian isolasi minyak transformator pada Gardu Induk Sekarputih di tabel 4, dilakukan *scoring*, *weighting*, dan *aggregation* berdasarkan CIGRE 761 (2019) untuk mendapatkan indeks minyak pada tabel 5.

Tabel 5 Hasil Scoring Matrix Isolasi Minyak Transformator

Kode Trafo	Water Content	BDV	Acid	IFT	Color	Aggregation	Indeks Minyak
IBT 5	A	A	A	B	A	0,4	A
TRF 6	A	B	B	B	B	1,4	B

Berdasarkan hasil pengujian isolasi minyak IBT 5 pada Gardu Induk Sekarputih, dilakukan perhitungan indeks minyak yaitu sebagai berikut:

IBT 5

*Water Content* = 4.80ppm = A

BDV = 84.53 Kv = A

*Acidity* = 0.0230 (mg KOH/g) = A

IFT = 28.20 mN/m = B

*Color Scale* = <0.5 = A

Score A= 0

Score B = 1

$$\frac{\sum_{i=1}^n S_i \times W_{pi}}{\sum_{i=1}^n W_{pi}} = \frac{0 \times 1 + 0 \times 1 + 0 \times 1 + 1 \times 1 + 0 \times 1}{1 + 1 + 1 + 1 + 1} = 0,2$$

Selanjutnya, nilai ini dimasukkan ke tabel 1 untuk mendapatkan indeks minyak. Didapatkan minyak isolasi trafo IBT 5 termasuk pada kategori A.

Berdasarkan hasil pengujian isolasi minyak transformator 6 pada Gardu Induk Sekarputih yaitu sebagai berikut:

TRF 6

*Water Content* = 7,28 ppm = A

BDV = 59,60 kV = B

*Acidity* = 0,06659 (mg KOH/g) = B

IFT = 33,10mN/m = B

*Colour Scale* = 0,8 = B

Score A= 0

Score B = 1

$$\frac{\sum_{i=1}^n S_i \times W_{pi}}{\sum_{i=1}^n W_{pi}} = \frac{0 \times 1 + 1 \times 1 + 1 \times 1 + 1 \times 1 + 1 \times 1}{1 + 1 + 1 + 1 + 1} = 0,8$$

Sehingga indeks minyak termasuk kategori B.

### 3.4 Recommended Action berdasarkan Indeks Minyak Transformator

Setelah dilakukan analisis hasil pengujian isolasi minyak pada tiap-tiap parameter hingga diketahui indeks minyak transformator pada tabel 5. Selanjutnya diberikan *recommended action* sesuai dengan hasil indeks minyak transformator. Berdasarkan hasil pengujian isolasi minyak IBT 5, parameter IFT memiliki skor B dan parameter *color*, *breakdown voltage*, *acid*, dan *water content* memiliki skor A. sehingga, indeks minyak pada IBT 5 termasuk dalam kategori A. *Recommended action* pada isolasi minyak IBT 5 berdasarkan CIGRE 761 (2019) adalah transformator dapat dioperasikan secara normal karena tanda-tanda degradasi pada isolasi minyak masih minim dan isolasi minyak masih seperti kondisi baru [12]. Sedangkan, berdasarkan IEC 60411 (2014) parameter IFT, *color*, *breakdown voltage*, *acid*, dan *water content* IBT 5 masih termasuk kategori baik sehingga direkomendasikan melanjutkan pengambilan sampel secara normal [15].

Pada TRF 6 hasil pengujian isolasi minyak dari parameter *color*, *breakdown voltage*, *acid*, dan *water content* mendapatkan skor B dan parameter *water content* yang mendapatkan skor A. Indeks minyak pada TRF 6 termasuk dalam kategori B. *Recommended action* yang sesuai untuk isolasi minyak TRF 6 secara keseluruhan berdasarkan CIGRE 761 (2019) adalah mengurangi interval pengambilan sampel pengujian agar dapat memonitor tingkat kerusakan pada isolasi minyak TRF 6 karena beberapa tanda degradasi atau kerusakan isolasi minyak mulai terlihat [12]. Sedangkan, berdasarkan IEC 60411 (2014) parameter IFT, *color*, *breakdown voltage*, *acid*, dan *water content* TRF 6 masih termasuk kategori baik sehingga direkomendasikan melanjutkan pengambilan sampel secara normal [15].

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengimplementasikan penilaian isolasi minyak transformator menggunakan metode *scoring matrix* yang dapat memberikan penilaian mengenai kondisi minyak isolasi transformator secara keseluruhan berdasarkan berbagai parameter pengujian (IFT, *color*, *breakdown voltage*, *acid*, dan *water content*). Hasil analisis menunjukkan TRF 6 mendapatkan nilai indeks kondisi minyak B, sementara IBT 5 mendapatkan nilai indeks kondisi minyak A. Indeks ini memudahkan dalam membandingkan kondisi minyak dari beberapa transformator berdasarkan banyak hasil pengujian. *Recommended action* juga diusulkan untuk kedua transformator, dimana IBT 5 direkomendasikan untuk melanjutkan pengambilan sampel secara normal dan transformator dapat dioperasikan secara normal karena tanda-tanda degradasi pada isolasi minyak masih minim seperti kondisi baru. Sedangkan TRF 6 direkomendasikan untuk mengurangi interval pengambilan sampel minyak agar dapat

memonitor tingkat kerusakan pada isolasi minyak TRF 6 lebih lanjut. Kedepannya, penelitian dapat dilanjutkan dengan menentukan faktor pembobotan dari tiap parameter uji berdasarkan tingkat kekritisan.

#### Daftar Pustaka

- [1] M. Borunda, O. A. Jaramillo, A. Reyes, and P. H. Ibarguengoytia, "Bayesian networks in renewable energy systems: A bibliographical survey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 32–45, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.030.
- [2] I. G. N. S. Hernanda, A. C. Mulyana, D. A. Asfani, I. M. Y. Negara, and D. Fahmi, "Application of health index method for transformer condition assessment," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2015-Janua, pp. 0–5, 2015, doi: 10.1109/TENCON.2014.7022433.
- [3] A. Rafianto, "Analisis Sistem on Load Tap Changer (Oltc) Pada Transformator 150/20 Kv Untuk Menjaga Kestabilan Tegangan Pada Gi Kaliwungu Jawa Tengah," *Media Elektr.*, vol. 12, no. 1, p. 12, 2019, doi: 10.26714/me.12.1.2019.12-28.
- [4] I. A. D. G. I. G. N. Segara Putra, W. G. Ariastina, I. N. S. Kumara, W. Sukerayasa, "Manajemen Pemeliharaan Transformator Tegangan Menengah Berbasis Hasil Analisis Gas Terlarut.pdf." 2013.
- [5] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter, "Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 230–239, 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.820175.
- [6] IEEE Std C57.106, *IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment*, vol. 2002, no. April. 2015.
- [7] W. R. Tamma, R. A. Prasojo, and Suwarno, "High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate," *High Volt.*, no. October 2020, pp. 314–327, 2021, doi: 10.1049/hve2.12074.
- [8] Suwarno and R. A. Pasaribu, "Thermal aging of mineral oil-paper composite insulation for high voltage transformer," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 8, no. 4. pp. 819–834, 2016. doi: 10.15676/ijeei.2016.8.4.9.
- [9] Z. Radakovic, E. Cardillo, and K. Feser, "The influence of transformer loading to the ageing of the oil-paper insulation.," *Xiith Intenarional Symposium in High Voltage Engineering, Netherlands 2003, Smit(ed.)*. pp. 1–4, 2003.
- [10] M. R. Meshkatodd, "Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 384–388, 2008, doi: 10.3844/ajeassp.2008.384.388.
- [11] K. Diwyacitta, R. A. Prasojo, and H. Gumilang, "Effects of Lifetime and Loading Factor on Dissolved Gases in Power Transformers," in *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS) 2017*, 2017, pp. 243–247.
- [12] CIGRE 761, *Condition assessment of power transformers*, no. March. 2019. doi: 10.1201/9781420015393-5.
- [13] A. N. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. R. R. Service, and W. Fan, "An approach to power transformer asset management using health index," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 25, no. 2, pp. 20–34, 2009, doi: 10.1109/MEI.2009.4802595.
- [14] Gaffar Lutfi Sutrayono, "Transformator Daya Berbasis Neural Network Untuk Mereduksi Jumlah Test," *Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, p. 55, 2015.
- [15] IEC 60422, *Standard Test Method for Furanic Compounds in Electrical Insulating Liquids by High-Performance Liquid Chromatography*. 2014.
- [16] PT. PLN (Persero) Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk Mojokerto, "Pengujian Isolasi Minyak Transformator 150 kV," 2022.
- [17] S. K. Diwyacitta\*, Rahman A. Prasojo, "Effects of Loading Factor in Operating Time on dielectric characteristics of transformer oil.pdf." 2017.
- [18] I. Fofana, A. Bouaïcha, Y. Hadjadj, J. S. N'Cho, T. Aka-Ngnui, and A. Béréal, "Early stage detection of insulating oil decaying," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, 2010, doi: 10.1109/CEIDP.2010.5724098.
- [19] N. Azis, D. Zhou, Z. D. Wang, D. Jones, B. Wells, and G. M. Wallwork, "Operational condition assessment of in-service distribution transformers," *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Cond. Monit. Diagnosis, C. 2012*, no. September, pp. 1156–1159, 2012, doi: 10.1109/CMD.2012.6416364.
- [20] A. H. Santoso, E. Rizka, and H. M. K., "Analisis Pembebanan Terhadap Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 kV Penyulang Lowokwaru di PT. PLN(PERSERO) UP3 Malang," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 9, no. 3, pp. 121–126, 2022,
- [21] Sukamdi, H. M. K., M. H. Farizan, and M. R. F. Firmansyah, "Analisis Rencana Pemasangan Transformator Sisipan Untuk Mengatasi Overload dan Drop Voltage pada Penyulang Selogabus PT. PLN (Persero) ULP Bojonegoro Kota," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 9, no. 3, pp. 127–133, 2022,