

Studi Performa Transformator Daya Menggunakan Metode Health Index di Gardu Induk Waru Sidoarjo

¹ Amir Kurniawan, ² Yuni Rahmawati, ³ Hari Putranto

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Universitas Negeri Malang, Malang

¹amir.kurniawan94@gmail.com, ²yuni.rahmawati.ft@um.ac.id, ³harput160661@gmail.com

Abstract - The power transformer is the main tool of electrical energy supply and must be operated continuously. 60 MVA and 50 MVA power transformers that are in Waru substation were operated for supplying electrical energy to large industries and households. In order to extend the service life and to avoid failure, assets management is needed in assessing the condition of power transformers to find the power transformer's overall condition and also to anticipate the unintended consequences. Health index is the method that used in this study to assess the power condition of the power transformer were the assessment based on insulating oil (DGA, oil quality, and furan) tap changer condition using data in the last three years. The data are used to determine the performance trend as an evaluation of the transformer condition. The results identified that the performance conditions of the Gardu Induk's transformers were in overall good condition, with normal maintenance measures. Stable performances showed by transformer 7 in 2016 until 2018 that reaches 75%. The highest performance reaches 95% that found on transformer 5 in 2018.

Keywords- *Transformers performance, insulating oil, tap changer condition, health index method, power transformer.*

Abstrak-Transformator daya merupakan alat utama dalam supply energi listrik serta harus beroperasi terus menerus. Transformator daya 50 MVA dan 60 MVA di GI Waru mayoritas beroperasi mengirim energi listrik pada industri besar dan perumahan. Supaya menghindari kegagalan dan memperpanjang umur operasi diperlukan aset manajemen dalam menilai performa kondisi transformator daya untuk mengetahui kondisi transformator daya keseluruhan dan mengantisipasi kerusakan yang tidak di inginkan. Pada penelitian ini metode yang digunakan dalam menilai kondisi transformator daya yakni metode health index dimana penilaian berdasarkan uji minyak isolasi (DGA, kualitas minyak, dan furan) dan kondisi tap changer menggunakan data tiga tahun terakhir. Data tiga tahun digunakan untuk mengetahui trend performa sebagai evaluasi kondisi dari transformator daya. Hasil penelitian ini mengidentifikasi bahwa performa kondisi keseluruhan transformator di Gardu Induk Waru dalam kondisi bagus, dengan tindakan perawatan normal. Performa yang stabil ditunjukkan pada tahun 2016-2018 oleh transformator daya 7 sebesar 75%. Performa paling tinggi mencapai 95 % ditemukan pada transformator daya 5 di tahun 2018.

Kata Kunci: *Performa transformator, minyak isolasi, kondisi tap changer, metode health index, transformator daya.*

I. PENDAHULUAN

Zaman sekarang, energi listrik merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting bagi industri dan perumahan. Konsumsi energi listrik selalu mengalami peningkatan setiap tahunnya terutama di wilayah Jawa Timur [1]. Alat utama dalam supply energi listrik adalah transformator daya. Transformator daya merupakan peralatan paling penting dan aset paling mahal pada sistem tenaga listrik serta harus beroperasi terus menerus [2]. Oleh karena itu, aset manajemen untuk memonitor efisiensi fungsi transformator dibutuhkan untuk mengantisipasi sebelum kerusakan terjadi dan memperpanjang umur operasi dari transformator daya.

Menurut manufaktur transformator daya biasanya beroperasi umur 25 sampai 40 tahun, namun bergatung beberapa hal salah satunya minyak isolasi dimana minyak isolasi akan mengalami degradasi karena kelembapan, panas dan faktor lainnya [3-4]. Performa minyak dapat dikatakan dalam kondisi baik jika memenuhi syarat seperti kekuatan dielektrik yang tinggi, tidak mudah korosi, mempunyai daya hantar panas yang baik, dll [5]. Selain berdasarkan minyak isolasi, 40 % kegagalan sering terjadi pada tap changer [6].

Gardu Induk Waru merupakan gardu induk terbesar di Jawa Timur yang melayani wilayah Surabaya dan Sidoarjo. Gardu Induk Waru mempunyai 1 unit Transformator daya kapasitas 50 MVA dan 4 unit transformator daya kapasitas 60 MVA. Gardu induk ini melayani kebutuhan energi listrik dimana penyalurannya diprioritaskan pada industri besar dan perumahan sehingga mengakibatkan tingginya permintaan energi listrik [7]. Tingginya permintaan energi listrik ini mengakibatkan tekanan sehingga diperlukan aset manajemen dalam menilai performa kondisi transformator daya untuk mengetahui kondisi transformator daya dan mengantisipasi kerusakan yang tidak di inginkan. Salah satu solusinya yakni menggunakan metode health index.

Health index adalah sebuah metode yang dapat menggabungkan data hasil pengujian laboratorium, inspeksi lapangan, dan pengamatan operasi. Metode ini melakukan penilaian dengan pendekatan ilmiah secara objektif dan kumulatif [8-12]. Penilaian metode health index ini sangat berguna untuk mendeteksi dan mengukur degradasi jangka

panjang yang dapat mengakibatkan akhir masa operasi transformator daya.

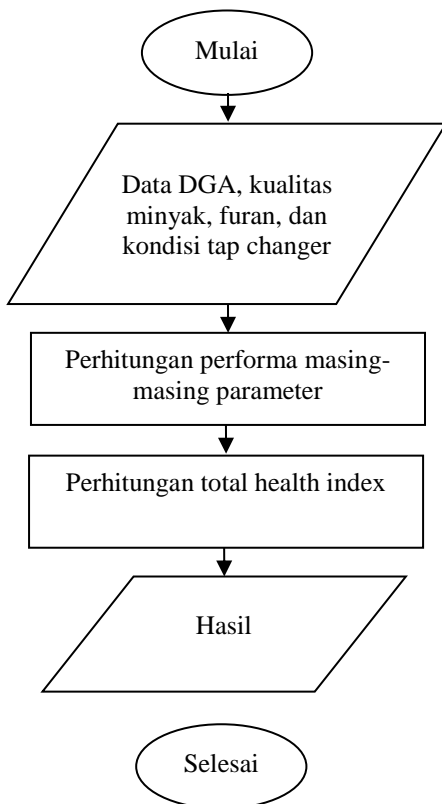
Di penelitian ini, penilaian performa transformator menggunakan metode health index dilakukan berdasarkan data pengujian minyak isolasi (DGA, Kualitas minyak, dan furan) dan kondisi tap changer. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui kondisi transformator daya, umur operasi, dan tindakan yang harus dilakukan berdasarkan hasil performa yang didapatkan serta kegagalan yang sedang terjadi.

II. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan analisis data sekunder. Objek penelitian ini menggunakan metode health index dalam menilai performa transformator daya serta analisis kegagalan dan rekomendasi berdasarkan gas terlarut. Analisa kegagalan menggunakan key gas sedangkan rekomendasi tindakan menggunakan total gas yang mudah terbakar (TDCG).

A. Perhitungan Metode Health Index

Bagian ini menjelaskan sejumlah langkah perhitungan menggunakan metode health index. Gambar 1 menghadirkan flowchart perhitungan metode health index.



Gambar 1. Flowchart perhitungan metode health index

Berdasarkan gambar flowchart perhitungan metode health index diatas yang mana terbagi menjadi 4 langkah. Langkah

pertama yakni data parameter yang terdiri dari dissolved gas analysis (DGA), kualitas minyak (tegangan tembus minyak, tegangan antarmuka, keasaman, kadar air), furan dan kondisi tap changer. Langkah kedua yakni perhitungan performa masing-masing parameter. Langkah ke tiga yakni perhitungan nilai total health index dari pengabungan hasil masing-masing performa parameter. Langkah terakhir yakni hasil dari metode health index.

Hasil keluaran dari perhitungan metode ini yakni kondisi transformator daya, tindakan pemeliharaan, dan prediksi umur operasi sesuai dari hasil performa transformator daya yang didapatkan.

1) Perhitungan Performa Masing-Masing Parameter

Penilaian performa masing-masing parameter untuk DGA dan kualitas minyak dengan menggunakan persamaan 1 [12]:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (S_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n (S_{max\ i} \times W_i)} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

Berdasarkan persamaan 1, n merupakan jumlah parameter, Si merupakan skor penilaian, Wi merupakan bobot nilai, dan Smax i merupakan skor maksimum.

a) Dissolved Gas Analysis (DGA)

Dissolved Gas Analysis (DGA) adalah sebuah alat yang digunakan untuk memantau kondisi transformator daya yang dilakukan berdasarkan berbagai gas terlarut pada minyak transformator daya [13-15]. Gas pada minyak transformator terbentuk dikarenakan terjadinya dekomposisi minyak dan dekomposisi kertas. Gas tersebut yakni hidrogen [H₂], metana [CH₄], etana [C₂H₆], etilen [C₂H₄], asetilen [C₂H₂], karbon monoksida [CO], dan karbon dioksida [CO₂]. Penilaian kondisi DGA merujuk standar IEEE.C57.104.2008 seperti pada tabel I.

TABLE I. FAKTOR SKOR DAN PEMBOBOTAN UNTUK DGA

Gas	Skor (Si)						Wi (Bobot)
	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

Berdasarkan tabel I dimana skor (Si) bernilai satu mengidentifikasi bahwa bernilai baik dan nilai skor enam bernilai jelek. Hasil dari penilaian tabel I yang sudah didapatkan kemudian dimasukkan ke dalam tabel II perbandingan faktor performa health index dengan %DGAF untuk mendapatkan presentase performa dan nilai health index faktor (HIF) dari parameter DGA. Tingkat performa kondisi DGA dapat dilihat pada tabel II.

TABLE II. PERBANDINGAN FAKTOR PERFORMA HEALTH INDEX DENGAN % DGAF[11]

Nilai HIF	Kondisi	Deskripsi
4	Baik	$\leq 20\%$
3	Dapat diterima	$21\% \leq x \leq 30\%$
2	Perlu pemantauan	$31\% \leq x \leq 40\%$
1	Jelek	$41\% \leq x \leq 50\%$
0	Sangat jelek	$\geq 50\%$

b) *Kualitas Minyak*

Kualitas minyak merupakan sekumpulan pengujian minyak isolasi transformator daya berdasarkan pengujian elektrik, fisik, dan kimia yang merujuk pada standar IEEE C57.106-2006 [16-17]. Pengujian kualitas minyak terdiri dari tegangan tembus minyak, tegangan antarmuka (IFT), keasaman, dan kadar air. Penilaian kualitas minyak merujuk pada tabel III.

TABLE III. FAKTOR SKOR DAN PEMBOBOTAN UNTUK KUALITAS MINYAK[8]

Parameter Minyak	Tegangan 69 -230 Kv (PPM)	Si (Skor)	Wi (Bobot)
Tegangan Tembus (Kv)	≥ 52	1	3
	47-52	2	
	35-47	3	
	≤ 35	4	
Kadar air (ppm)	≤ 20	1	4
	20-25	2	
	25-30	3	
	≥ 30	4	
Keasaman (mgKOH/gram)	≤ 0.04	1	1
	0.04-0.1	2	
	0.1-0.15	3	
	≥ 0.15	4	
Tegangan Antarmuka (IFT)	≥ 30	1	2
	23-30	2	
	18-23	3	
	≤ 18	4	

Berdasarkan tabel III dimana skor (Si) bernilai satu mengidentifikasi kondisi baik, bernilai dua menunjukkan kondisi normal dan bernilai tiga serta empat menunjukkan nilai jelek. Hasil dari penilaian tabel III yang sudah didapatkan kemudian dimasukkan ke dalam tabel IV perbandingan faktor performa health index dengan %OQF (Oil Quality Factor) untuk mendapatkan presentase performa dan nilai health index faktor (HIF) dari parameter kualitas minyak. Tingkat kondisi performa kualitas minyak dapat dilihat pada tabel IV.

TABLE IV. PERBANDINGAN FAKTOR PERFORMA HEALTH INDEX DENGAN %OQF[11]

Nilai Huruf	Kondisi	Deskripsi
A	Baik	$\leq 25\%$
B	Normal	$26\% \leq x \leq 40\%$
C	Waspada	$41\% \leq x \leq 60\%$
D	Jelek	$61\% \leq x \leq 80\%$
E	Sangat Jelek	$\geq 81\%$

c) *Furan*

Furan adalah senyawa organik yang terbentuk karena buruknya selulosa pada kertas isolasi. Buruknya selulosa

mengakibatkan terlepasnya rantai selulosa. Terlepasnya rantai selulosa tersebut akan membentuk unit monomer glukosa dimana unit monomer glukosa ini akan bereaksi dengan kimia membentuk senyawa furan. Senyawa furan yang sering digunakan dalam menganalisa kondisi yakni 2FAL dikarenakan mempunyai stabilitas yang tinggi diantara yang lain. Analisa furan ini bisa ditambahkan apabila gas karbon monoksida dan karbon dioksida dalam kondisi sangat jelek[15]-[16]. Penilaian furan merujuk langsung pada tabel V untuk mendapatkan nilai HIF.

TABLE V. PENILAIAN FURAN [8]

Nilai HIF	Kondisi	2FAL (ppb)
4	Baik	0 – 100
3	Normal	100 – 250
2	Waspada	250 – 500
1	Jelek	500 -1000
0	Sangat jelek	>1000

d) *Kondisi Tap Changer*

Kondisi tap changer merupakan kondisi keseluruhan dari tap changer. Tap changer merupakan bagian yang bergerak pada transformator sehingga mudah mengalami kegagalan mekanik, elektrik, thermal, dan kimia. Tap changer mempunyai fungsi yakni menstabilkan tegangan keluaran dikarenakan tegangan masukan dari pembangkit yang tidak stabil [18].

Penilaian kondisi tap changer merujuk langsung pada tabel VI untuk mendapatkan nilai HIF. Penilaian diperoleh berdasarkan kinerja komponen tap changer dan visual inspeksi yang dilakukan oleh teknisi. Bagian bagian tap changer terdiri dari diverter switch, tap selector, tahanan transisi, minyak tabung tap changer, motor, relai, tutup tap changer, dan minyak konservator [19-20].

TABLE VI. PENILAIAN TAP CHANGER [10]

Nilai Huruf	Kondisi	Deskripsi
A	Baik	Beroperasi normal
B	Layak	Terdapat 1-2 masalah
C	Waspada	Terdapat 3 masalah
D	Buruk	Terdapat 4 masalah
E	Sangat Buruk	Lebih dari 4 masalah

2) *Perhitungan Total Health Index*

Perhitungan total health index merupakan perhitungan seluruh kondisi transformator. Perhitungan bisa dilakukan setelah nilai performa dan nilai health index faktor (HIF) masing masing parameter didapatkan. Perhitungan total nilai kondisi health index dapat dihitung dengan persamaan 2 dimana K_j adalah konstanta pada kriteria kondisi, HIF_j adalah faktor index performa pada kriteria kondisi, HIF_{max} adalah Faktor index performa maksimum dan %HI adalah persentase health index keseluruhan. Penilaian untuk parameter DGA, kualitas minyak dan furan dikali 0.6 sedangkan untuk parameter tap changer dikali dengan 0.4 dengan merujuk pada tampilan tabel VII dibawah ini [11].

$$HI\% = 0,6 \times \left(\frac{\sum(K_j \times HIF_j)}{\sum(K_j \times HIF_{max})} + 0,4 \times \frac{\sum(K_j \times HIF_j)}{\sum(4 \times K_j)} \right) \times 100 \dots\dots (2)$$

TABLE VII. PENILAIAN HEALTH INDEX [11]

No	Parameter Transformator	Kj	Nilai Kondisi	HIFj
1	DGA	10	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
2	Minyak	8	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
3	Furan	6	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0
4	Kondisi Tap Changer	5	A,B,C,D,E	4,3,2,1,0

3) Hasil Keluaran Health Index

Hasil keluaran dari metode health index yaitu: kondisi, prediksi umur operasi, dan tindakan pemeliharaan berdasarkan keluaran nilai performa. Semua hasil tersebut seperti yang tertera pada tabel VIII performa kondisi transformator daya.

TABLE VIII. PERFORMA KONDISI TRANSFORMATOR DAYA [8][11]

% HI	Kondisi	Tindakan	Prediksi Umur
86-100	Baik	Perawatan normal	Lebih dari 15 tahun
71-85	Normal	Perawatan normal	Lebih dari 10 tahun
51-70	Waspada	Meningkatkan pengujian atau Diagnosis	10 tahun
31-50	Jelek	Memulai perencanaan penanganan resiko	Kurang dari 10 tahun
0-30	Sangat Jelek	Penanganan dan pemulaian resiko	Mendekati akhir umur

B. Analisa Kegagalan dan Rekomendasi Berdasarkan Gas Terlarut

Analisa kegagalan dan rekomendasi tindakan berfungsi membantu metode health index untuk menganalisa jenis kegagalan yang terjadi dan rekomendasi tindakan berdasarkan gas terlarut. Analisa kegagalan menggunakan teknik interpretasi key gas sedangkan rekomendasi tindakan menggunakan total dissolved gas analysis (TDCG).

1) Key Gas

Key Gas adalah sebuah alat yang digunakan untuk menentukan jenis kegagalan yang terjadi berdasarkan gas paling dominan. Key gas mendeteksi empat jenis gangguan yakni termal minyak, termal selulosa, partial discharge, dan arcing. Hubungan antara key gas dan jenis kegagalan dapat diringkas sebagai berikut [14]:

- H₂ : kegagalan partial discharger
- CO dan CO₂ : kegagalan isolasi termal selulosa
- CH₄ dan C₂H₆ : kegagalan termal minyak temperatur rendah
- C₂H₄ : kegagalan termal minyak temperatur tinggi

- C₂H₂ : kegagalan arching

2) TDCG

Sebuah analisa yang digunakan untuk mengawasi degradasi material isolasi dengan cara menjumlah konsentrasi gas. TDCG membagi batasan konsentrasi gas terlarut menjadi 4 kondisi sesuai tingkatan TDCG.

TABLE IX. BATAS KONSENTRASI GAS TERLARUT

Status	Level TDCG
Kondisi 1	720
Kondisi 2	721 – 1920
Kondisi 3	1921 – 4630
Kondisi 4	>4630

Kondisi 1 menunjukkan transformator beroperasi dengan normal, kondisi 2 menunjukkan tingkat konsentrasi gas sudah melebihi batas normal memungkinkan munculnya gejala kegagalan, kondisi 3 menunjukkan tingkat konsentrasi gas tingkat tinggi kegagalan mungkin sudah terjadi, dan kondisi 4 menunjukkan kerusakan parah.

III. Hasil dan Diskusi

Penelitian ini, penilaian kondisi transformator daya dilakukan di gardu induk waru sidoarjo. Penilaian metode health index diterapkan pada empat unit transformator kapasitas 60 MVA dan satu unit transformator kapasitas 50 MVA berdasarkan data pengujian minyak dan visual inspeksi kondisi tap changer dari tahun 2016 sampai 2018 di gardu induk Waru.

A. Perhitungan Metode Health Index

Untuk aplikasi perhitungan parameter dissolved gas analysis (DGA), dan parameter kualitas minyak (tegangan tembus, tegangan antarmuka, keasaman, dan kadar air) diproses oleh persamaan 1 dengan keluaran hasil merujuk pada tabel I dan II untuk penilaian dissolved gas analysis (DGA) sedangkan tabel III dan IV untuk penilaian kualitas minyak. Sementara parameter furan dan parameter tap changer diproses langsung oleh penilaian tabel yang sudah ditetapkan. Penilaian tabel V untuk furan dan penilaian tabel VI untuk visual kondisi tap changer. Setelah nilai hasil masing masing parameter didapatkan. Langkah selanjutnya yakni mencari nilai kondisi keseluruhan dari semua parameter menggunakan persamaan 2. Berikut hasil performa masing-masing parameter dan kondisi keseluruhan:

1) Performa Hasil Kondisi Dissolved Gas Analysis

Perhitungan persentase dissolved gas analysis dengan menggunakan persamaan 1 didapatkan nilai persentase terendah yakni 19.44% yang terjadi pada transformator 5 dan 6 di tahun yang sama yakni pada tahun 2018 sedangkan persentase tertinggi pada transformator 4 di tahun 2016 dengan memperoleh 58.33%. berikut tabel X menampilkan hasil performa parameter DGA pada masing masing transformator.

TABLE X. PERFORMA HASIL PARAMETER DGA

Transformator	2016		2017		2018	
	DGAF	HIF	DGAF	HIF	DGAF	HIF
3	30.56	3	33.33	2	25	3
4	58.33	0	33.33	2	33.33	2
5	29.63	3	37.04	2	19.44	4
6	27.78	3	33.33	2	19.44	4
7	44.44	1	44.44	1	27.78	3

Didasarkan pada tabel II, semakin besar nilai presentase menunjukkan performa kondisi semakin jelek sebaliknya semakin kecil nilai presentase menunjukkan performa kondisi semakin baik. Melihat hasil dari tabel X menunjukkan bahwa performa kondisi jelek secara konstan terjadi pada tahun 2017 untuk semua transformator kecuali transformator 7.

2) Performa Hasil Kualitas Minyak

Perhitungan performa hasil kualitas minyak menggunakan persamaan 1 dengan penilaian skor dan pembobotan pada tabel III. Tabel XI menampilkan performa hasil parameter faktor kualitas minyak.

TABLE XI. PERFORMA HASIL KUALITAS MINYAK

Transformator	2016		2017		2018	
	OQF	HIF	OQF	HIF	OQF	HIF
3	25	4	25	4	25	4
4	25	4	25	4	25	4
5	30	3	25	4	32.5	3
6	25	4	25	4	25	4
7	25	3	25	4	32.5	3

Didasarkan pada tabel IV, performa kondisi dari kualitas minyak menunjukkan dalam kondisi baik. Hal ini dapat dilihat pada tabel X dimana nilai keluaran kualitas minyak yang sering muncul yakni bernilai 25 terutama pada tahun 2017.

3) Performa Hasil Furan

Performa hasil penilaian parameter furan merujuk pada tabel V scoring furan. Penilaian data furan di gardu induk waru dilakukan hanya pada transformator 5 di tahun 2017 dengan skor sebesar 0.195 ppb. Dikarenakan pengujian furan bisa dilakukan ketika nilai konsentrasi karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO₂) dalam kondisi jelek. Melihat dari skor furan pada transformator 5, skor 0.195 termasuk dalam kondisi baik dengan nilai health index faktor sebesar 4.

4) Performa Hasil Keseluruhan Tap Changer

Performa hasil kondisi keseluruhan tap changer didapatkan dari visual inspeksi yang dilakukan oleh teknisi di gardu induk waru.

TABLE XII. PERFORMA HASIL PARAMETER TAP CHANGER

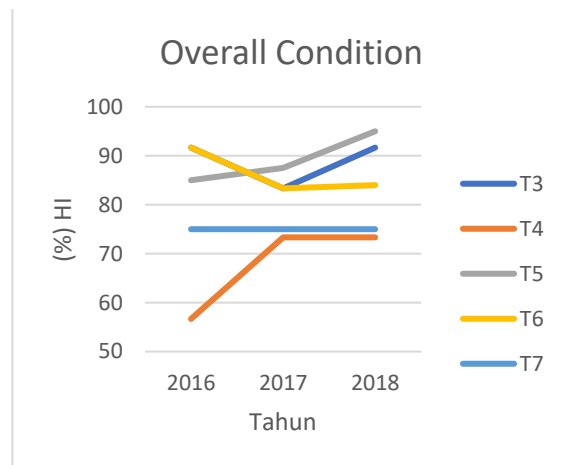
Trafo	2016		2017		2018	
	Tap changer	HIF	Tap Changer	HIF	Tap Changer	HIF
3	A	4	A	4	A	4
4	B	3	B	3	B	3
5	A	4	A	4	A	4
6	A	4	A	4	A	4
7	A	4	A	4	B	3

Didasarkan pada tabel VI, Performa hasil kondisi keseluruhan tap changer didapatkan dalam kondisi baik dan layak. Kondisi layak terjadi karena terdapat satu kegagalan di bagian tap changer yakni ada nya minyak yang rembes pada bagian tabung konservator seperti terlihat dalam tabel XII performa hasil parameter tap changer.

5) Perhitungan Total Health Index

Perhitungan kondisi keseluruhan merupakan perhitungan gabungan dari performa DGA, kualitas minyak, furan, dan tap changer yang telah didapatkan. Perhitung keseluruhan health index dilakukan menggunakan persamaan 2. Perhitungan merujuk pada tabel VII penilaian health index.

Berdasarkan gambar 2, grafik dibawah performa nilai tertinggi yakni sebesar 95% terjadi pada transformator 5 di tahun 2018 sedangkan performa nilai terendah sebesar 56.67% terjadi pada transformator 4 di tahun 2016. Nilai performa transformator daya 4 tahun 2016 masuk kategori waspada dikarenakan performa DGA dalam kategori jelek. Performa stabil didapatkan pada transformator 7 dari tahun 2016 sampai 2018 yakni sebesar 75%. Melihat dari hasil dari nilai keluaran secara keseluruhan performa transformator daya dalam keadaan baik. Berikut tampilan grafik keseluruhan transformator daya di Gardu induk Waru.



Gambar 2. Grafik Kondisi Total Health Index

B. Analisa Kegagalan dan Rekomendasi Berdasarkan Gas Terlarut

1) Hasil Hubungan Antara Key Gas dengan Jenis Kegagalan

Hasil hubungan key gas dengan jenis kegagalan didapat bahwa terdapat tiga jenis kegagalan yang sering terjadi yakni kegagalan termal minyak temperatur rendah, kegagalan selulosa, dan kegagalan termal minyak temperatur tinggi. Untuk kegagalan paling dominan dalam tiga tahun terakhir yakni jenis kegagalan termal minyak temperatur rendah. Jenis kegagalan yang terjadi dapat dilihat dalam tabel XIII dibawah ini.

TABLE XIII. HASIL KEGAGALAN DISSOLVED GAS ANALYSIS

Jenis Kegagalan	2016	2017	2018
Termal minyak temperatur rendah	Trafo 3,4	Trafo 3,4,6,7	Trafo 3,4,6,7
Termal selulosa	Trafo 5,6	Trafo 5	Trafo 5
Termal minyak temperatur tinggi	Trafo 7	-	-

2) Hasil Rekomendasi dengan TDCG

Hasil rekomendasi tindakan dengan TDCG digunakan untuk mengetahui tingkat konsentrasi gas terlarut yang mudah terbakar. Tingkat jumlah konsentrasi gas berfungsi sebagai indikator kondisi trafo dan tindakan yang harus dilakukan berdasarkan gas terlarut. Berikut hasil total dissolved gas analysis (TDCG):

TABLE XIV. HASIL TOTAL DISSOLVED GAS ANALYSIS

Kondisi	2016	2017	2018
Kondisi 1	Trafo 3,6	Trafo 3,6	Trafo 3,5,6,7
Kondisi 2	Trafo 5,7	Trafo 4,5,7	Trafo 4
Kondisi 3	Trafo 4	-	-

Berdasarkan tabel XIV, indikasi mungkin terjadi kegagalan terdapat pada transformator 4 di tahun 2016 sehingga perlu dilakukan pengambilan sampel minyak lebih rutin. kondisi tersebut sama dengan persentase performa DGA menggunakan metode health index dimana performa transformator daya 4 di tahun 2016 mendapat nilai 58.33% yang mengindikasikan bahwa kondisi sangat jelek.

IV. Kesimpulan dan Saran

Didasarkan pada hasil penelitian, Performa kondisi terbaik yakni sebesar 95 % yang terjadi pada transformator 5 di tahun 2018 sedangkan performa kondisi terendah terjadi pada transformator daya 4 dengan nilai health index 56.67 % di tahun 2016 dikarenakan performa DGA yang sangat jelek sedangkan berdasarkan TDCG masuk dalam kategori kondisi 3 yang berarti kegagalan mungkin sudah terjadi. Untuk jenis kegagalan dominan pada gas terlarut yakni kegagalan temperatur rendah.

Nilai performa transformator daya di gardu induk waru secara keseluruhan menunjukkan dalam kondisi baik dan sangat baik dalam tiga tahun terakhir dengan prediksi umur transformator lebih dari 10-15 tahun dan disarankan untuk teknisi melakukan tindakan perawatan normal untuk memperpanjang umur operasi transformator.

V. Daftar Pustaka

[1] Direktorat Jendral ketenagalistrikan 2017, kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2017.
 [2] K. Taengko and P. Damrongkulkamjorn, "Risk Assessment for Power Transformer in PEA Substation using Health index," 10th ICEECTIT, Krabi, Thailand, 2013.

[3] F.L Dixon, D. Steward and J. Hoffmeister, "When to Replace Aging Transformers," Pert. and Chem. Indu. Conf. (PCIC), pp. 1-14, 2010.
 [4] D. Zhou, Z. Wang, P. Jaman, and C. Li, "Data Requisites for Transformer Statistical Lifetime Modelling-Part II: Combination of Random and Aging-Related Failures," IEEE Trans. On Pow. Deli., Vol29, No. 1,2014.
 [5] B.L. Tobing, "Peralatan Tegangan Tinggi" pp. 200, 2012.
 [6] CIGRE Working Group 12.05, "An international survey on failure in large poer transformer in service", Electra, no.88, May 1983.
 [7] PT. PLN- Gardu Induk Waru (Perusahaan Listrik Negara-Gardu Induk Waru Sidoarjo). Indonesia. 2018.
 [8] A.N. Jeromi, R. Piercy, S. Cress, J. Service, and W. Fan, "An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index," Electrical Insulation Magazine, IEEE, vol. 25, pp.20-34,2009.
 [9] F. Ortiz, I.Fernandez, A. Ortiz, C.J. Renedo, F. Delgado, and C. Fernandez, "Health Indexes for Power Transformer: A Case Study," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 32, No.5, pp.7-17, September/October.2016.
 [10] W. Wattakapaiboon and N. Pattanadech, "The New Developed Health Index for Transformer Condition Assessment," ICCMD, Xian, China, 2016.
 [11] J. Haema and R. Phadungthin, "Condition Assessment of The Health Index for Power Transformer", PEAM 2012, Wuhan, China, Sep 14-16,2012.
 [12] T. Hjartarson and S. OtaI, "Predicting Future Asset Condition Based on Current Health Index and Maintenance Level," prenseted at 11th IEEE Conf. Transmission & Distribution Contruccion, Operation and Live-Line Maintenance, Albuquerque, NM, Oct.2006.
 [13] N.A. Bakar, A. Abu-Siada and S. Islam, "A Review of Dissolved Gas Analysis Measurement And Interpretation Techniques," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.30, No.3, pp. 39-49,2014.
 [14] W.H. Tang, and Q.H. Wu, "Condition Monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence" Springer-London Dordrecht Heidelberg New York, pp. 3-8, 2011.
 [15] Transformer Commitee of the IEEE Power & Energy Engineering Society. 2008. IEEE Guide for Interpretasion of Gases Generated in Oil-Immersed Transformer. IEEE Standard C57.104-2008.
 [16] IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. IEEE Standard 4231509-C57.106-2006.
 [17] FIST Volume 3-30, Transformer Maintenance, October 2000.
 [18] T. Gonen, "Modern Power System Analysis", 2rd ed., CRC Press: Taylor & Francis Group, LLC, 2013, pp.483.
 [19] PT. PLN (Persero) Pusat Pendidikan dan Pelatihan, "On Load Tap Changer" pp. 1-6, 2009.
 [20] J.H. Harlow, "Electric Power Transformer Engineering", 2rd ed., CRC Press: Taylor & Francis Group, LLC, 2007, pp.28-31.