Jurnal Teknik Elektro: Electronic Control, Telecomunication, Computer Information and Power System

P-ISSN: 2502-0986 **E-ISSN: 2686-0635**

Tinjauan Epistemologis dan Aksiologis Metode DGA dalam Memprediksi Usia Pakai Transformator

Rudi Irmawanto*[1], Syaad Patmanthara[2], Arif Nur Afandi[3]
[a,b] Universitas Negeri Malang
[1] rudi.irmawanto.2505349@students.um.ac.id ; [2] syaad.ft@um.ac.id ; [3] an.afandi@um.ac.id

ARTICLE INFO

Article History
Submission : 19-02-2026
Revision : 02-03-2026
Accepted : 26-08-2026

ABSTRAK (10PT)

Penelitian ini mengevaluasi penerapan metode Dissolved Gas Analysis (DGA) sebagai instrumen ilmiah dalam mendiagnosa usia transformator, ditinjau dari perspektif epistemologis, studi ini menelaah bagaimana data empiris berupa konsentrasi gas terlarut (H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CO, dan CO_2) dikonversi menjadi pengetahuan prediktif yang valid. Melalui pendekatan studi kasus kuantitatif pada periode 2017–2025, proses pemerolehan pengetahuan dilakukan melalui triangulasi metode interpretasi standar IEEE C57.104-2019 dan IEC 60599, meliputi Total Dissolved Combustible Gas (TDCG), Key Gas, Roger's Ratio, dan Segitiga Duval. Validitas inferensi diperkuat dengan penerapan logika matematika melalui regresi linier untuk memproyeksikan sisa usia pakai (lifespan) berdasarkan tren degradasi variabel gas C_2H_6 dan CO studi kuantitatif dengan pendekatan studi kasus yang memanfaatkan data hasil uji Dissolved Gas Analysis (DGA) pada minyak isolasi transformator selama periode 2017 hingga 2025. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan beberapa metode interpretasi berdasarkan standar IEEE C57.104-2019 dan IEC 60599. Metode-metode tersebut antara lain Total Dissolved Combustible Gas (TDCG), Key Gas Method, Roger's Ratio, serta Segitiga Duval. Setiap metode digunakan untuk mengidentifikasi potensi jenis gangguan internal, tingkat keparahan, serta kecenderungan perubahan karakteristik gas terlarut dalam minyak isolasi. Selain analisis kondisi, penelitian ini juga melakukan prediksi usia pakai transformator dengan menerapkan regresi linier. Dalam model penelitia ini, variabel bebas berupa konsentrasi gas terlarut yang mengalami peningkatan signifikan, sementara variabel terikat adalah estimasi usia transformator berdasarkan tren degradasi. Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi gas CO dan C_2H_6 yang menjadi indikator utama terjadinya thermal aging serta proses degradasi selulosa pada bagian isolasi padat. Berdasarkan interpretasi dengan metode TDCG, kondisi transformator masih berada dalam kategori operasional yang dapat diterima, meskipun menunjukkan gejala awal yang memerlukan pemantauan lebih intensif untuk mencegah proses kerusakan yang lebih cepat. Sementara itu, melalui pemodelan regresi linier, diperoleh estimasi sisa usia pakai transformator dengan menggunakan variabel C_2H_6 dan CO, yaitu berkisar antara 27,1 hingga 27,4 tahun. Hasil temuan ini menunjukkan bahwa meskipun transformator masih dapat beroperasi sesuai dengan standar operasional, tren peningkatan gas terlarut perlu

Kata Kunci:
Residual Gas, Dissolved Gas Analisys, Insulating Oil, Lifespan of Transformers

dijadikan dasar kajian untuk penyusunan strategi pemeliharaan prediktif yang lebih optimal untuk menjaga keandalan peralatan dalam jangka panjang.

This is an open access article under license CC–BY-SA.

1. Pendahuluan

Transformator merupakan peralatan vital yang berfungsi untuk mendistribusikan tenaga listrik dari pembangkit ke beban-beban listrik secara efektif dan efisien. Karena transformator memiliki peran yang sangat vital untuk penyaluran tenaga, maka keandalan transformator sangat penting untuk dijaga. Salah satu upaya untuk menjaga transformator tetap bekerja secara optimal adalah dengan melakukan pemeliharaan baik secara prediktif maupun reguler untuk menjaga kinerja transformator. Bagian yang perlu dijaga dari transformator adalah kondisi minyak isolasi yang bersinggungan langsung dengan belitan dan komponen yang ada dalam transformator. Dalam operasionalnya transformator akan menghasilkan peningkatan suhu thermal yang akan mempengaruhi kondisi dari minyak isolasi.

Keandalan transformator sangat dipengaruhi oleh kualitas sistem isolasi, khususnya minyak transformator yang berfungsi sebagai media pendingin dan isolator utama. Seiring waktu, penggunaan transformator secara terus-menerus menyebabkan minyak mengalami degradasi termal maupun kimia, yang dapat menurunkan kemampuannya dalam menjaga kinerja isolasi. Kondisi ini berpotensi menimbulkan kegagalan isolasi, yang merupakan salah satu penyebab utama terjadinya kerusakan transformator. Kegagalan semacam ini tidak hanya mengurangi usia pakai peralatan, tetapi juga dapat berdampak signifikan terhadap kontinuitas suplai tenaga listrik.

Dalam praktiknya, DGA dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu gas chromatography dan photoacoustic spectroscopy. Gas chromatography merupakan metode konvensional yang telah lama digunakan dan memiliki tingkat akurasi tinggi dalam mengidentifikasi serta mengukur kadar gas terlarut. Sementara itu, photoacoustic spectroscopy menawarkan alternatif yang lebih modern dengan kemampuan analisis cepat dan sensitivitas tinggi terhadap berbagai jenis gas. Kedua metode ini memungkinkan peneliti untuk untuk memperoleh data diagnostik secara komprehensif sehingga kondisi minyak isolasi dapat dievaluasi secara tepat dan efisien

Di sisi lain, penerapan metode ini tidak lepas dari dimensi aksiologis nilai guna. bertujuan untuk kemaslahatan praktis. Kegagalan transformator tidak hanya berdampak pada kerusakan alat, tetapi memiliki konsekuensi luas terhadap terhentinya suplai listrik yang merugikan masyarakat dan industri. Oleh karena itu, penggunaan DGA memiliki nilai etis dan pragmatis sebagai landasan strategi pemeliharaan berbasis kondisi (condition-based maintenance). Pergeseran paradigma dari pemeliharaan reaktif menuju prediktif melalui DGA mencerminkan nilai efisiensi dan keselamatan (safety), yang bertujuan mencegah kegagalan katastropik sebelum terjadi.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan sintesis antara tinjauan teknis dan filosofis tersebut. Melalui studi diagnostik terhadap data DGA periode 2017–2025, penelitian ini tidak

hanya akan menghitung sisa usia transformator secara matematis, tetapi juga memaknai proses tersebut sebagai upaya ilmiah dalam memvalidasi pengetahuan (epistemologi) demi mencapai keandalan sistem yang bernilai guna tinggi (aksiologi).

2. Metode Penelitian

A. Dissolved Gas Analysis (DGA)

Dissolved Gas Analysis adalah sebuah tes yang dilakukan dengan mengambil sampel transformator untuk kemudian dilakukan ekstraksi dari kandungan gas yang ada dalam sampel minyak. Setelah gas terekstraksi, maka akan dilakukan pemisahan guna mengidentifikasi kandungan kadar partikel atau gas yang ada di dalam minyak. Keuntungan yang paling utama dari metode DGA adalah proses deteksi dini dari kemungkinan kegagalan yang mungkin terjadi pada transformator. Kekurangan dari metode ini yaitu memerlukan tingkat kemurnian yang tinggi dari sampel minyak trafo, hal ini disebabkan rata - rata alat pengetesan DGA memiliki sensitivitas tinggi. Sehingga ketidakmurnian dari sampel yang dianalisis akan menurunkan akurasi tes DGA.

Terdapat dua penyebab utama pembentukan gas di dalam transformator dan pada akhirnya terlarut ke dalam minyak isolator, yaitu akibat dari gangguan yang terjadi pada transformator ketika beroperasi serta proses dekomposisi thermal dari material-material yang ada di dalam transformator. Semua transformator akan menghasilkan gas sampai pada tingkat tertentu ketika beroperasi pada kondisi suhu operasi normal. Gas yang terbentuk akibat dari operasional transformator diantaranya Hydrogen (H_2), Methane (CH_4), Acetylene($C2H_2$), Ethylene ($C2H_24$), dan Ethane (C_2H_6). Apabila material isolator yang terdapat di dalam transformator memiliki kandungan selulosa maka juga akan muncul gas terlarut seperti Carbon Monoxide (CO), dan Carbon Dioxide (CO_2).

Total Dissolved Combustible Gas (TDCG) adalah salah satu parameter utama dalam analisis Dissolved Gas Analysis (DGA) yang digunakan untuk menilai tingkat kesehatan internal transformator. Metode ini menghitung total akumulasi gas-gas mudah terbakar yang terlarut di dalam minyak isolasi. Gas-gas tersebut terbentuk akibat kerusakan termal atau kerusakan elektris pada komponen transformator. Tabel 1 menunjukkan indikasi operasi transformator dengan metode TDCG berdasarkan standar IEEE.C57-105-2008.

Tabel 1. Batas konsentrasi gas terlarut (ppm)

Kondisi	H_2 (ppm)	CH_4 (ppm)	$C2H_2$ (ppm)	C_2H_4 (ppm)	C_2H_6 (ppm)	CO (ppm)	CO_2 (ppm)	*TDCG* (ppm)
I	100	120	1	50	65	350	2500	720
II	101-700	121-400	2-9	51-100	66-100	351-570	2501-4000	721-1920
III	701-1800	401-1000	10-35	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-5630
IV	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630

Nilai TDCG = jumlah seluruh konsentrasi gas-gas di atas (ppm).

B. Metode Keygas

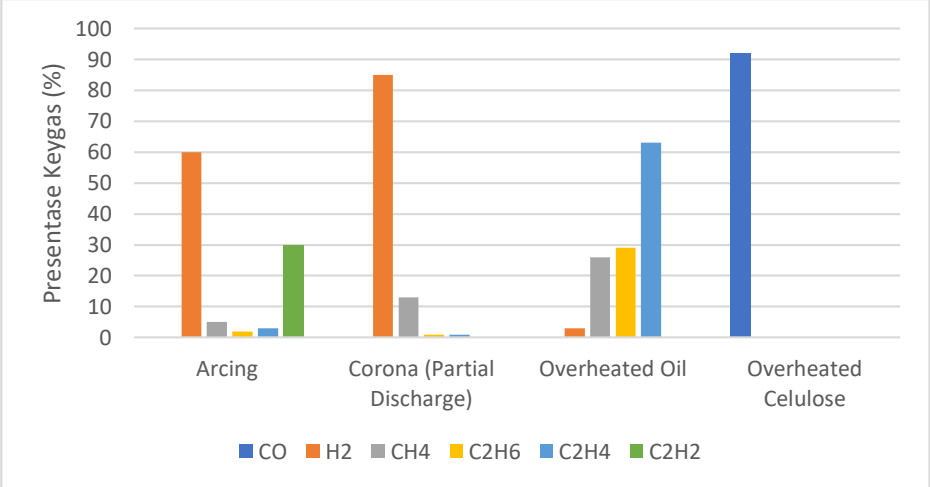
Metode keygas (IEEE std.C57 – 104.1991) diartikan sebagai gas yang terbentuk pada transformator berpendingin minyak yang secara kualitatif dapat digunakan untuk menentukan jenis kegagalan yang terjadi, berdasarkan jenis gas dominan yang terbentuk pada berbagai suhu. Keberadaan gas-gas yang lepas sebagai akibat dari gangguan tergantung pada besarnya suhu atau energi yang memecah struktur kimiawi dari minyak isolator. Secara umum terdapat empat jenis gangguan yang dapat di deteksi dengan metode ini yaitu overheating pada minyak isolator transformator, overheating pada material selulosa (kertas isolator), corona (partial discharge), dan arcing, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2. Sedangkan tabel 3 dan gambar 1 menunjukan perbandingan presentase pada masing-masing fault gas yang terbentuk pada minyak transformator.

Tabel 2. Indikasi gangguan metode keygas

1	C_2H_4	*Thermal Oil*
2	CO	*Thermal Cellulose*
3	H_2	*Partial Discharge*
4	$H_2 + C2H_2$	*Arcing*

Tabel 3. Kriteria dan persentase fault gas

Fault	Key Gas	Kriteria	*Gas Percent Amount*
Arcing	*Acetylene*	Sejumlah besar H_2 dan $C2H_2$ dan sedikit kuantitas dari CH_4 dan C_2H_4. CO dan CO_2 mungkin akan timbul apabila terdapat bagian trafo yang terbuat dari selulosa	*H_2; 60% $C2H_2$:30%*
Corona (Partial Discharge)	*Hydrogen*	Sejumlah besar H_2, sebagian CH_4 dengan sejumlah kecil C_2H_6 dan C_2H_4. kehadiran CO dan CO_2 dapat timbul apabila ada bagian transformator terbuat dari selulosa	*H_2: 85% CH_4: 13%*
Overheating Oil	*Ethylene*	Kadar C_2H_4 lebih besar dari C_2H_6, terdapoat Sebagian kecil dair CH_4 dan H_2	*C_2H_4: 63% C_2H_6: 20%*
Overheating Celulose	*Carbon Monoxide*	Sebagian besar CO dan CO_2, kandungna gas hydrocarbon juga mungkin timbul	*CO: 92%*



Gambar 1. Persentase perbandingan fault gas

C. Segitiga Duval

Pertimbangan metode ini menggunakan tiga gas terlarut yaitu Methane (CH_4), Acetylene($C2H_2$), Ethylene ($C2H_24$) yang persentase konsentrasinya digambar ke dalam pada sebuah grafik segitiga, dimana ketiga sisi dan ketiga sudut akan membentuk pminyakgon. Resultan dari pminyakgon atau segitiga yang terbentuk kemudian dibagi menjadi area fault yang merupakan pminyakgon lain dengan ukuran yang berbeda. Kemudian titik perpotongan dari pminyakgon dan segitiga yang terbentuk dapat dihitung dan area fault akan teridentifikasi. Segitiga ABC memiliki sudut A (a1, a2), B (b1, b2), C (c1, c2). Koordinat dari puncak A, B, C telah ditentukan sebagai [50 50], [0 0], dan [100 0]. Tabel klasifikasi tipe fault yang teridentifikasi di setiap zona pada segitiga duval dapat diamati pada tabel 4. Sedangakan diagram alir dari proses DGA pada minyak transformator dengan menggunakan segitiga duval dapat dilihat pada diagram alir di gambar 2.

Tabel 4. Tipe fault dan variabel yang digunakan pada segitiga duval

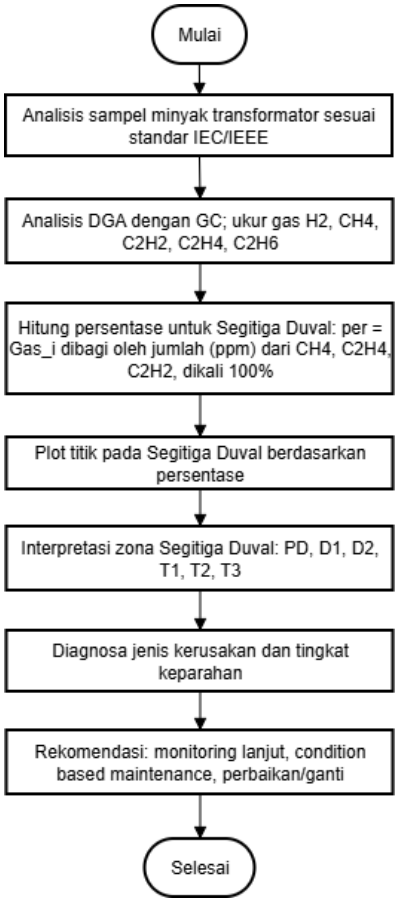
No.	Tipe *fault*	*Fault* yang termasuk	Variabel
1.	*Low Energy Discharge*	*PD dari tipe percikan seperti* tusukan yang terkarbonasi dan lubang	D1
2.	*High Energy Discharge*	*Discharge pada minyak / kertas*	D2
3.	*Fault Thermal < 300* ℃	Kertas menjadi kecoklatan	T1
4.	*Fault* Thermal 300 – 700 ℃	Karbonisasi pada kertas	T2
5.	Kombinasi *Fault Thermal dan Electrical*	*Discharges bertenaga rendah, lubang jarum*	DT
6.	*Partial discharge*	*Cold plasma discharges (Corona), gelembung udara*	PD

Kemudian untuk menentukan besaran, persentase tiap gas terlarut agar dapat di implementasikan pada segitiga duval dipergunakan persamaan 1 sampai 3.

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} \times 100\% \quad (1)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C2H4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} \times 100\% \quad (2)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} \times 100\% \quad (3)$$



Gambar 2. Diagram alir proses DGA pada minyak transformator menggunakan segitiga duval

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam bagian ini akan dibahas mengenai hasil observasi yang akan dimulai dari pembahasan data yang terdiri atas data merek dan spesifikasi transformator, data spesifikasi minyak transformator, data hasil analisis metode DGA, dan analisis perhitungan menggunakan regresi untuk memprediksi usia transformator berdasarkan hasil DGA. Tabel 5 menunjukkan data hasil pengujian DGA dari minyak transformator yang diambil dari beberapa pengujian terakhir.

Tabel 5. Data hasil uji DGA dari tahun 2017 – 2025

Parameter	2017	2018	2019	2021	2023	2024	2025
Hydrogen (H_2)	5	5	10	19	3	2	2
Methane (CH_4)	80	96	73	97	74	21	52
Ethane (C_2H_6)	211	276	295	275	195	132	147
Ethylene (C_2H_4)	14	14	14	4	8	8	17
Acetylene ($C2H_2$)	1	1	1	1	0.24	0.24	0.24
Carbon Monoxide (CO)	152	94	119	136	127	22	17
CO_2	4064	3735	1699	1426	3725	1814	1364

Data hasil uji DGA dari tabel 5 akan di analisis dengan menggunakan beberapa metode yaitu TDCG, Roger's Ratio, Key Gas, Duval Triangle, serta Ratio Donenburg. Metode-metode tersebut bertujuan untuk mengetahui penyebab munculnya gas terlarut pada transformator.

3.1. Metode Total Dissolved Combustible Gas (TDCG)

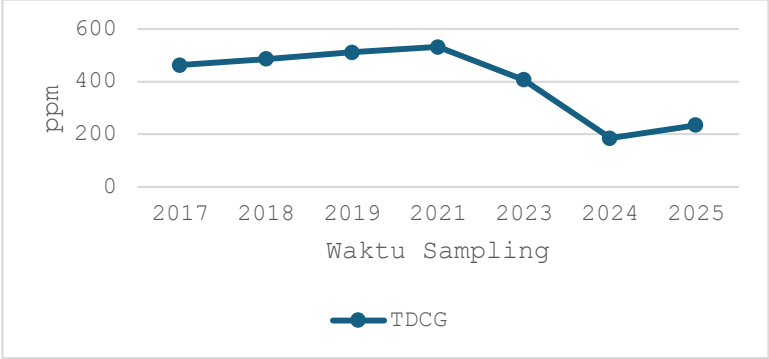
Metode TDCG adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk menginterpretasikan hasil dari DGA dari transformator. Metode ini memanfaatkan data jumlah total gas terlarut yang mudah terbakar pada minyak sampel. Berdasarkan standar IEEE C.57.104.2019 gas yang mudah terbakar yang terkandung dalam minyak transformator antara lain Hydrogen (H_2), Methane (CH_4), Ethylene (C_2H_4), ethane (C_2H_6), Acyteline ($C2H_2$), dan Carbon Monoxide (CO), dari hasil penjumlahan gas tersebut kemudian akan didapatkan nilai TDCG yang ada pada minyak transformator. Dimana kondisi kandungan gas terlarut akan dikelompokkan sesuai warna yang akan direpresentasikan untuk mempermudah pengelompokan ambang batas TDCG. Setiap warna mewakili tingkatan kondisi kandungan gas terlarut pada transformator.

Tabel 6. Interpretasi DGA dengan TDCG

Parameter	Unit	2017	2018	2019	2021	2023	2024	2025
Hydrogen (H_2)	ppm	5	5	10	19	3	2	2
Methane (CH_4)	ppm	80	96	73	97	74	21	52
Ethane (C_2H_6)	ppm	211	276	295	275	195	132	147
Ethylene (C_2H_4)	ppm	14	14	14	4	8	8	17
Acetylene ($C2H_2$)	ppm	1	1	1	1	0.24	0.24	0.24
Carbon Monoxide (CO)	ppm	152	94	119	136	127	22	17
CO_2	ppm	4064	3735	1699	1426	3725	1814	1364
TDCG	ppm	463	486	512	532	407.24	185.24	235.24

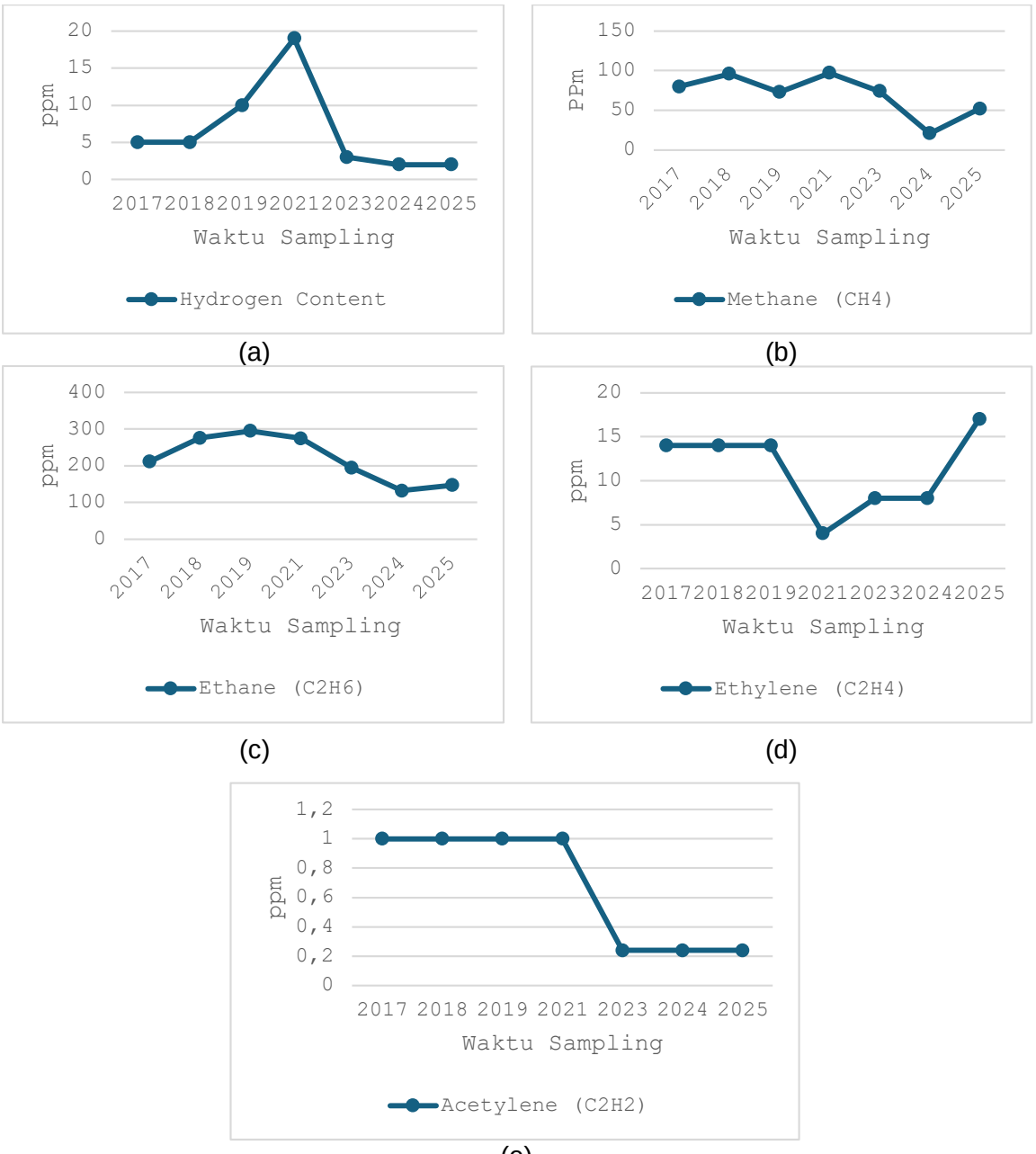
Tabel 7. Batas dan pengelompokan kondisi TDCG

Kondisi	H_2	CH_4	$C2H_2$	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2	*TDCG*
I	100	120	1	50	65	350	2500	720
II	101-700	121-400	2-9	51-100	66-100	351-570	2501-4000	721-1920
III	701-1800	401-1000	10-35	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-5630
IV	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630



Gambar 3. Grafik TDCG

Berdasarkan data pada tabel 6 dan 7 serta gambar 3, terlihat bahwa terjadi penurunan nilai TDCG pada pengujian tahun 2025 jika dibandingkan dengan pengujian sebelumnya. Namun, masih diperlukan pengamatan kandungan gas secara individu untuk melihat tren kenaikan kadar gas mudah terbakar pada minyak transformator.



Gambar 4. Tren kandungan gas: (a) Hidrogen, (b) Metana, (c) Etana, (d) Etilen, dan (e) Asitilen pada Minyak Transformator

Grafik di gambar 4(a) menunjukkan sempat terjadi kenaikan pada tahun 2021 pada kadar gas hidrogen, namun hasil ini masih dalam rentang kategori wajar karena secara individu kandungan gas H_2 dalam transformator masih berada pada kondisi 1 berdasarkan standar IEEE C.57.104.2019. Sedangkan grafik pada gambar 4(b) menunjukkan kenaikan gas methane (CH_4)

terbesar terjadi pada pengujian tahun 2021 jika dibandingkan dengan pengujian sebelumnya terjadi kenaikan sebesar 24 ppm yang dapat menjadi indikasi timbulnya panas berlebih pada belitan transformator saat sedang beroperasi. Pada gambar 4(c), dari data hasil uji dapat dilihat rentang kenaikan gas ethane yang cukup tinggi pada tahun 2019 dan berpotensi menjadi gangguan bagi operasional transformator, secara rata – rata menurut standar IEEE C.57.104.2019 nilai ethane pada transformator sudah dalam kondisi 4, tingginya nilai ethane mungkin terjadi akibat adanya kenaikan thermal berlebih pada rentang rendah <300 ℃ dan sedang hal ini dapat menjadi indikator timbulnya titik panas pada belitan transformator. Grafik pada gambar 4(d) menunjukkan hasil pengujian DGA tahunan terjadi penurunan pada kandungan Ethylene terlarut pada minyak transformator, rentang pergerakan nilai yang masih berada pada rentang kondisi 1 merupakan nilai yang wajar pada operasi transformator. Dan dari grafik pada gambar 4(e), gas Acetylene yang terkandung pada minyak transformator yang memiliki nilai stabil menunjukkan performa transformator yang dalam kondisi baik. Gas Acetylene dapat terjadi apabila suhu dalam transformator mencapai >700 ℃ yang dapat terjadi saat terdapat fenomena hubung singkat pada belitan transformator. Gambar 5 menunjukan sebaran data kandungan gas dengan menggunakan metode key gas.

3.2. Metode Roger's Ratio

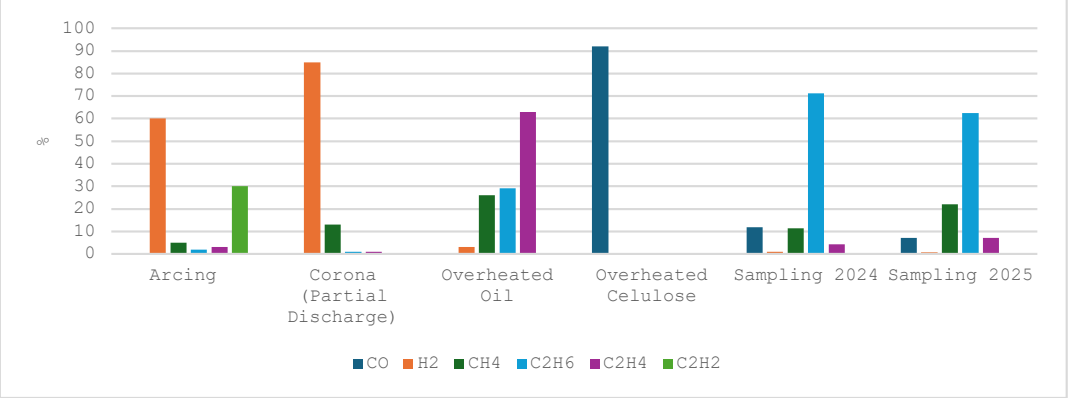
Metode interpretasi DGA dengan menggunakan Roger's Ratio merupakan salah satu metode pelengkap dalam melakukan analisis DGA. Hasil dari perhitungan menggunakan metode ini yaitu jika hasil dari perbandingan gas bernilai >1 maka rasio dari perbandingan adalah 1, dan apabila hasil dari perbandingan gas <1 maka rasionya adalah 0. Kemudian hasil perbandingan yang telah dihitung akan di korelasikan dengan tabel untuk mengetahui jenis gangguan yang terjadi pada transformator. Untuk melakukan analisis dengan metode Roger's Ratio yang dipergunakan adalah hasil sampel terakhir dari minyak transformator yang akan di analisis dengan menggunakan persamaan 1, 2, dan 3. Tabel 8 menunjukkan interpretasi kadar gas dengan menggunakan metode Roger's Ratio.

$$R1\ \left(\frac{CH4}{H2}\right) = \frac{52}{2} = 26 = 1$$
$$\mathrm{R2}\ \left(\frac{\mathrm{C_2H_6}}{\mathrm{CH_4}}\right) = \frac{147}{52} = 28 = 1$$
$$R3\ \left(\frac{C2H4}{C2H6}\right) = \frac{17}{147} = 0.11 = 0$$
$$R4\ \left(\frac{C2H2}{C2H4}\right) = \frac{0.24}{14} = 0.017 = 0$$

Tabel 8. Tabel Roger's Ratio

R1	R2	R3	R4	Keterangan
0	0	0	0	Normal Deterioration
1	0	0	0	Slight overheating 150 ℃
1	1	0	0	Slight overheating 150 ℃ – 200 ℃
0	1	0	0	Slight overheating 200 ℃ – 300 ℃
0	0	1	0	General conductor overheating
1	0	1	0	Ciculating current / overheating joint
0	0	0	1	Flashover without power follow through
0	1	0	1	Tap changer selector breaking current
0	0	1	1	Arc with power follow through of persistent sparking

Hasil interpretasi dengan metode *Roger's Ratio* dapat diketahui bahwa terdapat fenomena *overheating* pada suhu rendah hingga medium (150 – 200 ℃). Hal ini dapat terjadi sebagai akibat dari *deteriorated insulation* material yang ada pada internal transformator.



Gambar 5. Grafik fenomena Key Gas

3.3. Metode Segitiga Duval (Duval Triangle)

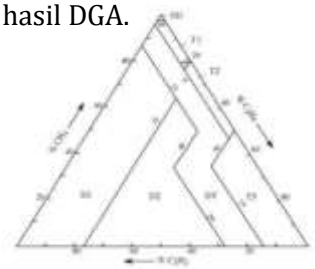
Selain metode TDCG, Key Gas, dan Roger's Ratio, metode lain yang sering digunakan sebagai pelengkap analisis hasil DGA adalah metode segitiga duval. Dalam metode ini yang dipergunakan untuk mengetahui kondisi dalam transformator adalah perbandingan komposisi antara gas Acetylene ($C2H_2$), Methane (CH_4), dan Ethylene (C_2H_4).

$$\%CH_4 = \frac{52}{52+17+0.24} \times 100\% = 75\%$$

$$\%C_2H_4 = \frac{17}{52+17+0.24} \times 100\% = 12\%$$

$$\%C_2H_2 = \frac{0.24}{52+17+0.24} \times 100\% = 0.002\%$$

Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa persentase gas CH_4 dalam sampel minyak transformator merupakan yang paling besar di angka 75% kemudian C_2H_4 12% dan $C2H_2$ 0.002% lalu kita interpretasikan dengan acuan grafik segitiga duval seperti yang terlihat pada gambar 6. Dari grafik segitiga duval (gambar 6) dapat diketahui bahwa jenis fault yang terjadi pada transformator berada pada area PD yang mana mengindikasikan adanya partial discharge yang terjadi pada transformator namun karena gas C_2H_4 dan $C2H_2$ masih relatif rendah maka dapat diasumsikan belum terjadi pemanasan dengan suhu yang tinggi pada transformator. Namun pada metode ini tidak dijelaskan secara spesifik level pemanasan atau besaran partial discharge yang terjadi pada transformator sehingga metode ini hanya bersifat sebagai pelengkap saja dalam interpretasi hasil DGA.



Gambar 6. Segitiga Duval

Tabel 9. Tipe fault dan variabel yang pada segitiga duval

Tipe *fault*	*Fault* yang termasuk	Variabel
Low Energy Discharge	*PD* dari tipe percikan seperti tusukan yang terkarbonasi dan lubang	D1
High Energy Discharge	*Discharge* pada minyak / kertas	D2
Fault Thermal < 300 ℃	Kertas menjadi kecoklatan	T1
Fault Thermal 300 – 700 ℃	Karbonisasi pada kertas	T2
Kombinasi *Fault Thermal* dan *Electrical*	*Discharges* bertenaga rendah,	DT
Partial discharge	*Cold plasma discharges (Corona)*, gelembung udara	PD

3.4. Prediksi Lifepan Transformator Dengan Analisis Regresi

Parameter yang ada dalam hasil uji DGA minyak transformator dapat dipengaruhi oleh berbagai macam faktor, salah satunya adalah penuaan yang membuat parameter tertentu dapat meningkat seiring berjalannya waktu. Hal ini dapat dimanfaatkan untuk membuat sebuah simulasi perkiraan sisa usia pakai (lifepan) transformator dengan membuat pemodelan matematika untuk membantu pengambilan keputusan dan perencanaan guna proses perbaikan maupun penggantian yang lebih efisien. Penelitian ini akan menggunakan metode analisis regresi, yang merupakan sebuah metode statistik untuk memodelkan hubungan antara variabel tergantung (sisa usia pakai) dan lebih variabel bebas (hasil pengujian DGA) untuk membuat sebuah model regresi yang dipergunakan untuk perkiraan sisa usia pakai transformator, dengan asumsi peningkatan nilai gas terlarut dalam transformator yang secara umum bersifat linier terhadap usia pakainya. Model data yang akan digunakan adalah usia trafo saat ini sebagai nilai Y dan variabel DGA sebagai nilai x. Model data dapat diamati pada tabel 10 dan tabel 11.

Perhitungan manual prediksi usia transformator menggunakan regresi linier sederhana dengan 1 variabel independen gas terlarut dan usia trafo sebagai target (contoh parameter C_2H_6) dapat diamati pada tabel 12.

Tabel 10. Model data gas C_2H_6 sebagai nilai X

x	y
211	21
276	22
295	23
275	25
195	27
132	28
147	29

Jumlah data (n) : 7

rata – rata CO_2 ($\bar{x}$):

$$\bar{x} = \frac{211+276+295+275+195+132+147}{7} = \frac{1531}{7} = 218.7$$

rata – rata usia transformator ($\bar{y}$):

$$\bar{y} = \frac{21+22+23+25+27+28+29}{7} = \frac{175}{7} = 25$$

$$y = b_0 + b_1 X$$

Di mana:

$$b1 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(yi - \overline{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2}$$
$$b0 = \bar{x} - b_1\bar{x}$$

Tabel 11. Model data setiap kandungan gas terhadap variabel x dan variabel y

Model Data H_2 Sebagai Nilai X		Model Data CH_4 Sebagai Nilai X		Model Data C_2H_6 Sebagai Nilai X		Model Data C_2H_4 Sebagai Nilai X	
y	x	y	x	y	x	y	x
21	5	21	80	21	211	21	14
22	5	22	96	22	276	22	14
23	10	23	73	23	295	23	14
25	19	25	97	25	275	25	4
27	3	27	74	27	195	27	8
28	2	28	21	28	132	28	8
29	2	29	52	29	147	29	17

Model Data $C2H_2$ Sebagai Nilai X		Model Data CO Sebagai Nilai X		Model Data CO_2 Sebagai Nilai X	
y	x	y	x	y	x
21	1	21	152	21	4064
22	1	22	94	22	3735
23	1	23	119	23	1699
25	1	25	136	25	1426
27	0.24	27	127	27	3725
28	0.24	28	22	28	1814
29	0.24	29	479	29	1364

Tabel 12. Tabel persiapan data pra-regresi

***xi* (CO_2)**	***yi* (*age*)**	$xi-\bar{x}$	$yi-\bar{y}$	$(xi-\bar{x})(yi-\bar{y})$	$(xi-\bar{x})^2$
211	21	-7.7	-4	38	59.29
276	22	57.3	-3	-171.9	3,283.29
295	23	76.3	-2	-152.6	5,821.69
275	25	56.3	0	0	3,169.69
195	27	-23.7	2	-47.4	561.69
132	28	-86.7	3	-260.1	7,516.89
147	29	-71.7	4	-286.8	5,140.89

Kemudian dilakukan perhitungan lanjutan untuk mencari nilai koefisien b1
Hitung koefisien b1

$$b1 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(yi - \overline{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2}$$
$$b1 = \frac{-888}{25553.43} = -0.03$$

Hitung intercept b0

$$b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x} = 25 - (-0.03 \times 218.7) = 31{,}561$$

Prediksi usia transformator:
Usia trafo = 31.561 +$(-0.03 \times CO_2)$
Usia trafo = 31.561 +(-0.03×10000)
Usia trafo = -275

$$\text{MAE} = \frac{\sum|y-\hat{y}|}{7}$$
$$\text{MAE} = \frac{11.027}{7}$$

MAE = 1.57

Evaluasi akurasi prediksi dengan menghitung MAE untuk model didapatkan bahwa dengan hasil MAE sebesar 1,575 maka model prediksi yang telah dibuat memiliki galat sebesar 1,58 tahun dari nilai aktual. Perhitungan di atas di aplikasikan ke semua data dan didapatkan hasil seperti pada tabel 13.

Tabel 13. Hasil regresi

Variabel	Koefisien	Intersep	MAE
H_2	-0.15	26.01	2.56
CH_4	-0.07	30.54	2.04
C_2H_6	-0.03	31.561	1.57
C_2H_4	-0.13	26.56	2.55
C_2H_2	-6.9	29.65	1.0008
CO	-0.04	28.9	1.66
CO_2	-0.001	28.5	2.49

Dari hasil regresi, dapat diketahui bahwa gas C_2H_2 memiliki nilai MAE yang paling rendah di antaranya variabel yang lain hal ini menunjukkan bahwa hasil regresi dari variabel $C2H_2$ paling mendekati kenyataan. Selain itu, hasil regresi dari model data C_2H_6 dan CO juga menunjukkan hasil yang cukup baik yaitu memiliki MAE <1.7 untuk parameter gas yang lain hasilnya kurang akurat karena memiliki nilai MAE yang tinggi yang menunjukkan model yang dipakai kurang baik dalam menunjukkan umur aktual transformator, hal ini dapat disebabkan adanya kemungkinan pola hubungan tidak linier dan fluktuatif. Hasil perhitungan akhir prediksi usia transformator dengan menggunakan metode regresi dapat dilihat di tabel 14. Dari hasil kalkulasi didapatkan perkiraan waktu yang dibutuhkan sebelum transformator mencapai ambang batas nilai DGA kondisi 4 dalam standar TDCG.

Tabel 14. Hasil perhitungan prediksi usia transformator

Variabel	Koefisien (b)	Intersep (a)	Limit ppm (X)	usia trafo (tahun)
C_2H_6	-0.01	28.90	150	27.06
C_2H_2	-6.70	30.10	35	-211.85
CO	0.01	22.10	1400	27.1

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Secara **Epistemologis**, penelitian ini membuktikan validitas metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) dan analisis regresi linier sebagai instrumen ilmiah yang andal untuk mengubah data empiris (konsentrasi gas) menjadi pengetahuan diagnostik dan prediktif. Meskipun ditemukan indikasi *overheating* (dominasi gas Etana/C_2H_6), triangulasi metode mengonfirmasi bahwa pengetahuan mengenai kondisi internal transformator dapat diperoleh secara akurat tanpa pembongkaran fisik

Secara **Aksiologis**, penelitian ini memiliki nilai kebermanfaatan praktis yang tinggi dalam mengubah strategi pemeliharaan dari reaktif menjadi prediktif. Hasil prediksi sisa usia pakai sekitar **27,4 tahun** memberikan landasan etis dan strategis bagi pengambilan keputusan guna menjamin keandalan sistem tenaga listrik serta mencegah kegagalan katastropik yang merugikan.

Referensi

[1] M. Chernyshev, Z. Baig, O. Bello, and S. Zeadally, "Internet of Things (IoT): Research, Simulators, and Testbeds," *IEEE Internet of Things Journal*., Vol. 5, No. 3, Pp. 1637–1647, 2018. https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2786639

[2] J. Rui and S. Danpeng, "Architecture Design of the Internet of Things based on Cloud Computing," in *Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Pp. 206–209, 2015. https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2015.57

[3] H. C. Hwang, J. Park, and J. G. Shon, "Design and Implementation of a Reliable Message Transmission System Based on MQTT Protocol in IoT," Wireless Pers Commun., Springer, 2016. https://doi.org/10.1007/s11277-016-3398-2

[4] W. Pipatsakulroj, V. Visoottiviseth, and R. Takano, "muMQ: A Lightweight and Scalable MQTT Broker," in *IEEE International Symposium on Local and Metropminyaktan Area Networks (LANMAN)*, 2017. https://doi.org/10.1109/LANMAN.2017.7972165

[5] A.Zabasta, *et. al,* "MQTT Service Broker for Enabling the Interoperability of Smart City Systems," in *IEEE Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)*, 2018. https://doi.org/10.1109/ES2DE.2018.8494341