

ANALISIS DISSOLVED GAS ANALYSIS PADA TRANSFORMATOR BERBASIS FR3 OIL MENGGUNAKAN METODE DUVAL TRIANGLE

Gilang Al Ghaniyy*, Tri Wrahatnolo

Teknik Elektro, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: gilang.23207@mhs.unesa.ac.id, triwrahatnolo@unesa.ac.id

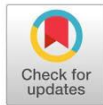
Info Artikel

Histori Artikel:

Diterima Agu 11, 2026

Direvisi Sep 20, 2026

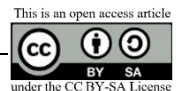
Disetujui Sep 26, 2026



ABSTRACT

Power transformers are essential components of electrical power systems that require continuous condition monitoring to ensure reliable operation. One of the most widely used diagnostic techniques is Dissolved Gas Analysis (DGA), which detects internal faults by analyzing gases dissolved in insulating oil. This study aims to evaluate the condition of a transformer insulated with natural ester (FR3 oil) using Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, and Duval Triangle 7. Historical DGA data from the Unit Auxiliary Transformer (UAT) #2A at Paiton Power Plant were analyzed using Project STARS, a web-based application developed with HTML and JavaScript. The results show that Duval Triangle 3 classified two datasets as Normal, three as T1 (Low Thermal Fault), and one as T3 (High Thermal Fault). Further analysis using Duval Triangle 6 resulted in Not Determined (N/D), while Duval Triangle 7 confirmed the T3 diagnosis. These findings demonstrate that the proposed approach supports systematic condition assessment of FR3 oil-insulated transformers for preventive maintenance.

Keywords: Power Transformer; Dissolved Gas Analysis (DGA); FR3 Insulating Fluid; Duval Triangle; Overheating.



ABSTRAK

Transformator tenaga merupakan peralatan vital dalam sistem tenaga listrik yang memerlukan pemantauan kondisi secara berkala untuk menjaga keandalan operasinya. Salah satu metode diagnosis yang banyak digunakan adalah Dissolved Gas Analysis (DGA) untuk mendeteksi indikasi gangguan internal melalui analisis gas terlarut dalam minyak isolasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi transformator berbasis natural ester (FR3 oil) menggunakan Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7. Data penelitian berupa data historis DGA Unit Auxiliary Transformer (UAT) #2A PLTU Paiton yang dianalisis menggunakan Project STARS berbasis HTML dan JavaScript. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Duval Triangle 3 mengidentifikasi dua data Normal, tiga data T1, dan satu data T3. Duval Triangle 6 menghasilkan klasifikasi Not Determined (N/D), sedangkan Duval Triangle 7 mengonfirmasi diagnosis T3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketiga metode tersebut mampu mendukung diagnosis transformator berbasis FR3 oil sebagai dasar pemantauan kondisi dan pemeliharaan preventif.

Kata Kunci: Transformator Daya; Analisis Gas Terlarut (DGA); Minyak Isolasi FR3; Segitiga Duval; Overheating.

Penulis Korespondensi:

Gilang Al Ghaniyy,

Teknik Elektro, Fakultas Teknik

Universitas Negeri Surabaya,

Jl. Ketintang, Kec. Gayungan, Surabaya, Jawa Timur.

Email: gilang.23207@mhs.unesa.ac.id



1. PENDAHULUAN

Transformator tenaga merupakan salah satu aset paling vital dalam sistem tenaga listrik karena berperan sebagai penghubung antara proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik melalui transformasi tingkat tegangan. Keandalan operasi transformator sangat memengaruhi kontinuitas penyaluran energi listrik, mengingat peralatan ini beroperasi secara kontinu dalam jangka waktu yang panjang dengan nilai investasi dan biaya penggantian yang tinggi. Kegagalan transformator dapat mengakibatkan gangguan pasokan listrik, kerusakan peralatan lain, serta kerugian ekonomi yang signifikan akibat terhentinya proses operasional. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan modern tidak lagi hanya berfokus pada tindakan korektif, tetapi juga mengarah pada *condition-based maintenance* yang didukung oleh pemantauan kondisi (*condition monitoring*) secara berkala untuk mendeteksi indikasi gangguan sejak dini sebelum berkembang menjadi kegagalan yang lebih serius. Dalam praktiknya, pemantauan kondisi transformator mengacu pada berbagai standar internasional, seperti IEC 60599:2022 yang memberikan panduan interpretasi gas terlarut pada peralatan berisi minyak mineral serta IEEE C57.155-2014 yang secara khusus membahas interpretasi gas pada transformator berbasis *natural ester* dan *synthetic ester* [1, 2]. DGA merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi indikasi gangguan pada transformator berdasarkan gas-gas terlarut dalam minyak isolasi [7].

Salah satu metode diagnosis yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kondisi internal transformator adalah *Dissolved Gas Analysis* (DGA). Metode ini bekerja dengan menganalisis gas-gas yang terbentuk akibat degradasi termal maupun elektrik pada minyak isolasi dan material selulosa selama transformator beroperasi. Berdasarkan standar IEC 60599 dan IEEE C57.104, komposisi serta konsentrasi gas seperti hidrogen (H_2), metana (CH_4), etana (C_2H_6), etilena (C_2H_4), dan asetilena (C_2H_2) dapat digunakan sebagai indikator untuk mengidentifikasi berbagai jenis gangguan internal, termasuk *partial discharge*, *low-energy discharge*, *high-energy discharge*, serta *thermal fault* pada rentang temperatur tertentu [1] [2]. Dibandingkan dengan metode diagnosis lainnya, DGA memiliki keunggulan karena dapat mendeteksi indikasi gangguan sejak dini tanpa mengganggu operasi transformator, sehingga banyak diterapkan dalam pemantauan kondisi transformator [8]. Berbagai metode interpretasi

DGA telah dikembangkan untuk mengidentifikasi jenis gangguan, seperti Key Gas Method, Rogers Ratio, IEC Ratio, Duval Triangle, dan Duval Pentagon. Di antara metode tersebut, Duval Triangle merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk menginterpretasikan jenis gangguan berdasarkan proporsi gas hasil degradasi pada minyak isolasi [3-6].

Di antara berbagai metode interpretasi DGA, Duval Triangle merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan karena mampu mengidentifikasi jenis gangguan berdasarkan proporsi relatif gas hasil degradasi tanpa bergantung pada nilai ambang konsentrasi gas. Metode yang dikembangkan oleh Michel Duval ini memanfaatkan kombinasi tiga gas utama yang diplot ke dalam diagram segitiga sehingga menghasilkan klasifikasi gangguan seperti *partial discharge* (PD), *low-energy discharge* (D1), *high-energy discharge* (D2), *thermal fault* (T1, T2, dan T3), serta kombinasi gangguan listrik dan termal (DT). Dibandingkan metode berbasis rasio gas, Duval Triangle memiliki keunggulan dalam memberikan hasil diagnosis yang lebih konsisten pada berbagai kondisi operasi transformator dan telah diadopsi secara luas sebagai salah satu metode interpretasi DGA yang direkomendasikan dalam praktik industri maupun penelitian. Seiring berkembangnya penggunaan fluida isolasi selain minyak mineral, Michel Duval juga mengembangkan beberapa varian Duval Triangle yang disesuaikan dengan karakteristik pembentukan gas pada media isolasi tertentu, termasuk Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7 yang secara khusus digunakan untuk transformator berbasis minyak ester alami (*natural ester*) seperti FR3 Oil [4, 7, 8].

Perkembangan teknologi transformator dalam beberapa dekade terakhir mendorong penggunaan fluida isolasi yang lebih aman dan ramah lingkungan sebagai alternatif minyak mineral konvensional. Salah satu fluida isolasi yang banyak digunakan adalah FR3 Oil, yaitu minyak ester alami (*natural ester*) yang berasal dari bahan nabati. Dibandingkan dengan minyak mineral, *natural ester* memiliki beberapa keunggulan, antara lain titik nyala (*fire point*) yang lebih tinggi sehingga dapat mengurangi risiko kebakaran, biodegradabilitas yang lebih tinggi sehingga lebih ramah lingkungan, serta kemampuan menyerap kelembapan yang lebih baik. Karakteristik tersebut menjadikan *natural ester* sebagai salah satu alternatif fluida isolasi pada transformator dengan mempertimbangkan aspek keselamatan dan lingkungan [9, 10].

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, penggunaan FR3 Oil juga membawa tantangan dalam proses diagnosis kondisi transformator. Perbedaan komposisi kimia antara minyak ester alami dan minyak mineral menyebabkan mekanisme degradasi serta pola pembentukan gas hasil DGA menjadi berbeda. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa transformator berbasis FR3 Oil cenderung menghasilkan karakteristik gas tertentu, seperti fenomena *stray gassing* pada kondisi operasi tertentu, yang tidak selalu mengindikasikan adanya gangguan serius sebagaimana interpretasi pada minyak mineral. Oleh karena itu, metode diagnosis yang dikembangkan untuk transformator berbasis minyak mineral tidak dapat diterapkan secara langsung pada transformator berbasis FR3 Oil. Untuk mengakomodasi perbedaan karakteristik tersebut, Michel Duval mengembangkan Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7 yang dirancang khusus untuk menginterpretasikan hasil DGA pada transformator dengan fluida isolasi natural ester, sehingga diagnosis yang diperoleh menjadi lebih akurat dan sesuai dengan karakteristik pembentukan gas pada FR3 Oil [3, 11, 12].

Perkembangan metode interpretasi DGA pada transformator terus mengalami penyempurnaan seiring meningkatnya penggunaan fluida isolasi selain minyak mineral. Michel Duval mengembangkan Duval Triangle sebagai metode diagnosis berbasis komposisi relatif gas terlarut dan selanjutnya memperluas metode tersebut agar dapat diaplikasikan pada transformator berbasis *natural ester* melalui pengembangan Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7 [7, 8]. Berbagai penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa metode Duval Triangle memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengidentifikasi gangguan termal maupun gangguan listrik berdasarkan karakteristik pembentukan gas hasil degradasi minyak isolasi. Di sisi lain, penelitian mengenai natural ester lebih banyak difokuskan pada evaluasi karakteristik fisik dan kimia fluida isolasi, pengaruhnya terhadap umur isolasi kertas, serta perbedaan pembentukan gas dibandingkan minyak mineral [11, 13, 14].

Beberapa penelitian tinjauan (*review*) dan penelitian eksperimental menunjukkan bahwa interpretasi DGA pada transformator berbasis *natural ester* memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan minyak mineral. Perbedaan karakteristik pembentukan gas tersebut perlu diperhatikan dalam proses diagnosis gangguan pada transformator dengan media isolasi *natural ester* [15, 16]. Sementara itu, Ali *et al.* membahas berbagai metode

konvensional DGA yang dapat digunakan untuk diagnosis gangguan transformator, termasuk *Duval Triangle*, *Duval Pentagon*, rasio IEC, rasio Rogers, dan metode gas kunci [17]. Wani *et al.* membahas perkembangan diagnosis berbasis DGA sebagai bagian dari *condition monitoring* transformator serta berbagai metode interpretasi yang digunakan untuk mengidentifikasi gangguan [5]. Meskipun berbagai penelitian telah membahas karakteristik pembentukan gas dan interpretasi DGA pada natural ester, sebagian penelitian masih menggunakan pengujian atau simulasi kondisi gangguan di laboratorium. Ketersediaan data DGA dari transformator natural ester yang beroperasi di lapangan masih relatif terbatas, sehingga penerapan metode diagnosis pada data historis *in-service* masih memerlukan kajian lebih lanjut [10, 15, 16, 18].

Berdasarkan uraian tersebut, dapat diketahui bahwa penelitian mengenai interpretasi Dissolved Gas Analysis (DGA) pada transformator berbasis FR3 Oil masih didominasi oleh pembahasan karakteristik pembentukan gas dan pengembangan metode diagnosis, sementara implementasinya pada data historis transformator yang beroperasi di lapangan masih relatif terbatas. Selain itu, penelitian yang mengintegrasikan penggunaan Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7 sebagai rangkaian diagnosis untuk transformator berbasis *natural ester* juga masih belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan pendekatan diagnosis menggunakan kombinasi ketiga metode Duval Triangle tersebut pada data historis Unit Auxiliary Transformer #2A PLTU Paiton yang menggunakan FR3 Oil, serta mengimplementasikannya dalam Project STARS (Smart Transformer Assessment and Recommendation System) berbasis HTML dan JavaScript untuk mendukung proses perhitungan, visualisasi, dan interpretasi hasil DGA secara terintegrasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi transformator berbasis FR3 Oil berdasarkan data historis DGA menggunakan Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7, sehingga hasil diagnosis yang diperoleh diharapkan dapat mendukung proses pemantauan kondisi serta pengambilan keputusan dalam pemeliharaan preventif transformator.

2. METODE PENELITIAN

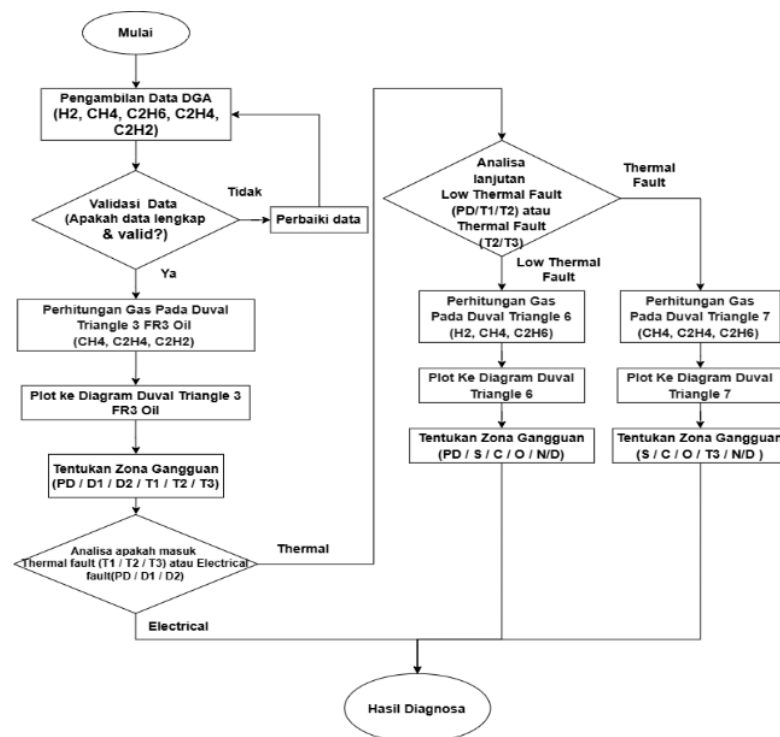
2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain penelitian diagnostik untuk

menganalisis kondisi transformator tenaga berbasis FR3 Oil berdasarkan data historis Dissolved Gas Analysis (DGA). Analisis dilakukan dengan menginterpretasikan kandungan gas terlarut hasil degradasi minyak isolasi menggunakan metode Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7. Ketiga metode tersebut dipilih karena dirancang khusus untuk transformator yang menggunakan fluida isolasi natural ester, sehingga mampu memberikan diagnosis yang lebih sesuai terhadap karakteristik pembentukan gas dibandingkan metode yang dikembangkan untuk minyak mineral.

Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan

data historis hasil pengujian DGA, kemudian dilakukan seleksi parameter gas sesuai dengan kebutuhan masing-masing metode Duval Triangle. Selanjutnya dilakukan perhitungan persentase gas terhadap total gas yang digunakan pada setiap metode, dilanjutkan dengan proses plotting pada diagram Duval Triangle menggunakan Project STARS (Smart Transformer Assessment and Recommendation System) yang dikembangkan berbasis HTML dan JavaScript. Hasil plotting kemudian diinterpretasikan untuk menentukan zona gangguan transformator berdasarkan karakteristik masing-masing Duval Triangle. Alur penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada [Gambar 1](#).



Gambar 1. Diagram alir analisis menggunakan Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7

2.2. Sumber dan Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa data historis Dissolved Gas Analysis (DGA) yang diperoleh dari hasil pengujian rutin Unit Auxiliary Transformer (UAT) #2A PLTU Paiton yang menggunakan fluida isolasi FR3 Oil (natural ester). Data diperoleh dari dokumen hasil pengujian laboratorium yang menjadi bagian dari kegiatan pemantauan kondisi transformator. Penggunaan data historis bertujuan untuk mengevaluasi kondisi karbon monoksida (CO). Seluruh data kemudian diseleksi, diverifikasi, dan disusun ke dalam format yang sesuai sebelum dilakukan proses perhitungan persentase gas dan analisis menggunakan Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, serta Duval Triangle

transformator berdasarkan karakteristik gas terlarut yang terbentuk selama transformator beroperasi tanpa melakukan pengujian eksperimental secara langsung.

Data yang digunakan meliputi konsentrasi gas hasil pengujian DGA dalam satuan part per million (ppm). Parameter gas yang dianalisis disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing metode Duval Triangle, yaitu metana (CH₄), etilena (C₂H₄), asetilena (C₂H₂), hidrogen (H₂), etana (C₂H₆), dan 7. Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang digunakan telah memenuhi kebutuhan analisis dan dapat diolah secara konsisten pada setiap metode diagnosis.

Tabel 1. Data historis DGA transformator

Tanggal Uji	UP	Trafo	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	C ₂ H ₆
09/11/2020	PLTU Paiton	Unit Auxiliary Transformer #2A	24	2	0	12	31
07/06/2021	PLTU Paiton	Unit Auxiliary Transformer #2A	308	777	10	12	216
5/10/2021	PLTU Paiton	Unit Auxiliary Transformer #2A	15	3	0	6	24
17/05/2022	PLTU Paiton	Unit Auxiliary Transformer #2A	35	2	0	14	44
29/11/2022	PLTU Paiton	Unit Auxiliary Transformer #2A	25	4	0	18	47
22/05/2023	PLTU Paiton	Unit Auxiliary Transformer #2A	28	5	0	21	58

2.3. Analisa Data

Analisis data dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi transformator berbasis FR3 Oil berdasarkan data historis Dissolved Gas Analysis (DGA) menggunakan metode Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7. Proses analisis dimulai dengan validasi data DGA untuk memastikan seluruh parameter gas yang dibutuhkan tersedia dan memiliki nilai yang valid. Selanjutnya dilakukan pemilihan parameter gas sesuai dengan metode Duval Triangle yang digunakan, kemudian dihitung persentase masing-masing gas terhadap total konsentrasi gas. Nilai persentase tersebut digunakan sebagai koordinat untuk proses plotting pada diagram Duval Triangle.

Diagnosis awal dilakukan menggunakan Duval Triangle 3. Apabila hasil diagnosis menunjukkan indikasi Partial Discharge (PD), Low Energy Discharge (D1), atau High Energy Discharge (D2), maka hasil tersebut digunakan sebagai diagnosis akhir. Sebaliknya, apabila hasil menunjukkan indikasi Thermal Fault (T1, T2, atau T3), maka dilakukan analisis lanjutan menggunakan Duval Triangle 6 atau Duval Triangle 7 untuk memperoleh klasifikasi gangguan termal yang lebih spesifik. Seluruh proses perhitungan, plotting, dan interpretasi dilakukan menggunakan Project STARS (Smart Transformer Assessment and Recommendation System) yang dikembangkan berbasis HTML dan JavaScript.

2.3.1. Perhitungan Persentase Gas

Sebelum dilakukan proses plotting, konsentrasi gas hasil pengujian DGA diubah menjadi nilai persentase terhadap total konsentrasi tiga gas yang digunakan pada masing-masing metode Duval Triangle. Perhitungan persentase dilakukan agar setiap sampel memiliki koordinat relatif yang dapat dipetakan pada diagram ternary sesuai dengan metode Duval.

Setiap metode menggunakan kombinasi gas yang berbeda sesuai karakteristik pembentukan gas pada transformator berbasis natural ester, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Gas pada Setiap Metode Duval Triangle

Metode	Parameter Gas	Fungsi
Duval Triangle 3	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂	Diagnosis awal seluruh jenis gangguan
Duval Triangle 6	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆	Diagnosis lanjutan untuk gangguan termal suhu rendah
Duval Triangle 7	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆	Diagnosis lanjutan untuk gangguan termal suhu tinggi

Persentase masing-masing gas dihitung menggunakan Persamaan (1)–(4).

$$Total_{Gas} = Gas_1 + Gas_2 + Gas_3 \quad (1)$$

Lalu lakukan persentase tiap gas nya:

$$\%Gas_1 = \frac{Gas_1}{Total_{Gas}} \times 100 \quad (2)$$

$$\%Gas_2 = \frac{Gas_2}{Total_{Gas}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%Gas_3 = \frac{Gas_3}{Total_{Gas}} \times 100 \quad (4)$$

Dengan keterangan Gas₁, Gas₂, Gas₃ merupakan gas yang digunakan pada masing-masing metode Duval Triangle.

- Untuk Duval Triangle 3, Gas₁ = CH₄, Gas₂ = C₂H₄, Gas₃ = C₂H₂.
- Untuk Duval Triangle 6, Gas₁ = H₂, Gas₂ = CH₄, Gas₃ = C₂H₆.
- Untuk Duval Triangle 7, Gas₁ = CH₄, Gas₂ = C₂H₄, Gas₃ = C₂H₆.

2.3.2. Implementasi Duval Triangle

Nilai persentase gas yang telah diperoleh selanjutnya digunakan sebagai masukan pada Project STARS untuk dilakukan proses plotting secara otomatis ke dalam diagram Duval Triangle 3. Diagram ini digunakan sebagai tahap diagnosis awal untuk mengidentifikasi jenis gangguan berdasarkan posisi titik hasil plotting.

Apabila hasil diagnosis berada pada zona PD, D1, atau D2, maka diagnosis dianggap selesai karena jenis gangguan telah dapat diidentifikasi melalui Duval Triangle 3. Namun, apabila hasil menunjukkan zona Thermal Fault (T1, T2, atau T3), sistem akan melanjutkan proses diagnosis menggunakan Duval Triangle 6 atau Duval Triangle 7 sesuai dengan karakteristik gangguan termal yang teridentifikasi. Seluruh proses plotting dilakukan secara otomatis menggunakan algoritma yang diimplementasikan dalam Project STARS, sehingga proses perhitungan koordinat, visualisasi diagram, dan penentuan zona gangguan dapat dilakukan secara konsisten tanpa perhitungan manual.

2.3.3. Interpretasi Hasil Diagnosis

Interpretasi hasil dilakukan berdasarkan zona gangguan yang diperoleh dari masing-masing metode Duval Triangle. Setiap zona merepresentasikan karakteristik gangguan tertentu pada transformator berbasis FR3 Oil.

Hasil diagnosis dari Duval Triangle 3 digunakan sebagai dasar untuk menentukan apakah diperlukan analisis lanjutan. Jika hasil menunjukkan gangguan listrik, yaitu PD, D1, atau D2, maka zona tersebut ditetapkan sebagai hasil diagnosis akhir. Sebaliknya, apabila hasil menunjukkan gangguan termal, yaitu T1, T2, atau T3, dilakukan analisis lanjutan menggunakan Duval Triangle 6 atau Duval

Triangle 7 untuk memperoleh klasifikasi gangguan yang lebih spesifik sesuai karakteristik transformator berbasis natural ester.

Hasil akhir diagnosis kemudian disajikan dalam bentuk visualisasi diagram Duval Triangle beserta informasi zona gangguan yang dihasilkan oleh Project STARS. Informasi tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kondisi transformator dan mendukung pengambilan keputusan dalam kegiatan pemeliharaan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Penelitian

Hasil penelitian disajikan berdasarkan tahapan diagnosis menggunakan Duval Triangle 3 sebagai diagnosis awal, kemudian dilanjutkan dengan Duval Triangle 6 dan Duval Triangle 7 sesuai dengan hasil klasifikasi yang diperoleh.

3.1.1. Hasil Duval Triangle 3

Duval Triangle 3 digunakan sebagai tahap diagnosis awal untuk mengidentifikasi jenis gangguan pada transformator berbasis natural ester (FR3 Oil) berdasarkan komposisi relatif gas CH₄, C₂H₄, dan C₂H₂. Seluruh data historis DGA yang diperoleh dari Unit Auxiliary Transformer (UAT) #2A PLTU Paiton dianalisis menggunakan metode ini untuk menentukan zona gangguan berdasarkan posisi titik hasil plotting.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi transformator mengalami perubahan selama periode pengamatan tahun 2020 hingga 2023. Rekapitulasi hasil diagnosis menggunakan Duval Triangle 3 ditunjukkan pada [Tabel 3](#).

Tabel 3. Hasil Diagnosis Menggunakan Duval Triangle 3

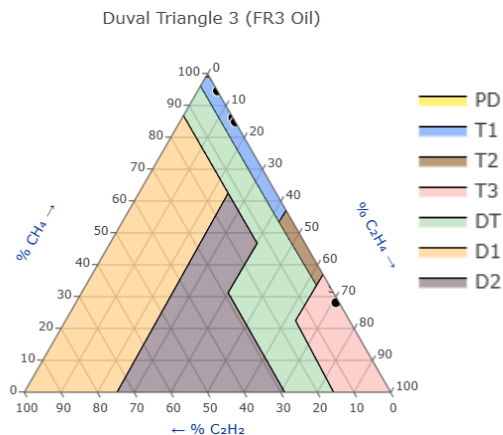
No.	Tanggal Pengujian	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	Hasil Duval Triangle 3
1	09/11/2020	24	2	0	Normal
2	07/06/2021	308	777	10	T3
3	5/10/2021	15	3	0	Normal
4	17/05/2022	35	2	0	T1
5	29/11/2022	25	4	0	T1
6	22/05/2023	28	5	0	T1

Berdasarkan [Tabel 3](#), dari enam data historis yang dianalisis diperoleh dua data berada pada kondisi Normal, tiga data berada pada zona T1 (Low Thermal Fault), dan satu data berada pada zona T3 (High Thermal Fault). Selama periode pengamatan

tidak ditemukan indikasi gangguan listrik berupa Partial Discharge (PD), Low Energy Discharge (D1), maupun High Energy Discharge (D2). Hal ini menunjukkan bahwa pola pembentukan gas pada transformator lebih didominasi oleh gangguan

termal dibandingkan gangguan akibat pelepasan muatan listrik.

Selanjutnya, hasil diagnosis divisualisasikan menggunakan Project STARS melalui diagram Duval Triangle 3, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Plotting Duval Triangle 3 dari Project STARS

Berdasarkan hasil plotting pada Gambar 2, dua data pengujian berada pada zona Normal, tiga data berada pada zona T1, dan satu data berada pada zona T3. Tidak ditemukan indikasi gangguan listrik berupa PD, D1, maupun D2 selama periode pengamatan. Hasil ini menunjukkan bahwa gangguan yang teridentifikasi didominasi oleh gangguan termal dengan tingkat keparahan yang bervariasi.

Sesuai dengan alur diagnosis yang digunakan pada penelitian ini, hasil Duval Triangle 3 menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan analisis lanjutan. Data yang berada pada zona T1 selanjutnya dianalisis menggunakan Duval Triangle 6 untuk memperoleh klasifikasi yang lebih rinci terhadap gangguan termal suhu rendah. Sementara itu, data yang berada pada zona T3 dianalisis menggunakan Duval Triangle 7 untuk memperoleh klasifikasi yang lebih spesifik terhadap gangguan termal bertemperatur tinggi. Pada penelitian ini tidak ditemukan data yang berada pada zona T2. Dengan demikian, Duval Triangle 6 dan Duval Triangle 7 digunakan sebagai metode diagnosis lanjutan setelah identifikasi awal menggunakan Duval Triangle 3.

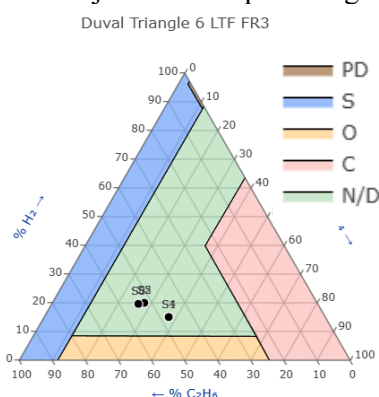
3.1.2. Hasil Duval Triangle 6

Analisis lanjutan menggunakan Duval Triangle 6 dilakukan terhadap data yang berdasarkan hasil Duval Triangle 3 berada pada zona T1, yaitu data hasil pengujian tanggal 17 Mei 2022, 29 November 2022, dan 22 Mei 2023. Sesuai metodologi penelitian, Duval Triangle 6 digunakan untuk memberikan klasifikasi yang lebih rinci terhadap gangguan termal suhu rendah pada transformator berbasis natural ester (FR3 Oil) dengan menggunakan parameter gas H_2 , CH_4 , dan C_2H_6 . Rekapitulasi hasil diagnosis menggunakan Duval Triangle 6 disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Diagnosis Menggunakan Duval Triangle 6

No	Tanggal Pengujian	H_2 (ppm)	CH_4 (ppm)	C_2H_6 (ppm)	Hasil Duval Triangle 6
1	17/05/2022	14	35	44	N/D
2	29/11/2022	18	25	47	N/D
3	22/05/2023	21	28	58	N/D

Selanjutnya, hasil diagnosis divisualisasikan menggunakan Project STARS pada diagram Duval



Gambar 3. Hasil Plotting Duval Triangle 6

Triangle 6, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4 dan Gambar 3, seluruh data yang dianalisis berada pada zona N/D (Not Determined). Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposisi relatif gas H_2 , CH_4 , dan C_2H_6 tidak memenuhi karakteristik zona gangguan yang telah didefinisikan pada Duval Triangle 6. Dengan demikian, meskipun hasil diagnosis awal menggunakan Duval Triangle 3 mengindikasikan Thermal Fault T1, analisis lanjutan menggunakan Duval Triangle 6 belum mampu mengklasifikasikan jenis gangguan secara lebih spesifik.

Zona N/D tidak secara langsung menunjukkan bahwa transformator berada dalam kondisi normal

maupun mengalami jenis gangguan tertentu, tetapi mengindikasikan bahwa pola pembentukan gas pada sampel yang dianalisis berada di luar batas klasifikasi Duval Triangle 6. Oleh karena itu, hasil ini menunjukkan bahwa Duval Triangle 6 memiliki keterbatasan dalam mengidentifikasi karakteristik gangguan untuk data yang dianalisis pada penelitian ini. Evaluasi lebih lanjut menggunakan metode diagnosis lain atau analisis terhadap tren kenaikan gas diperlukan untuk memperoleh interpretasi kondisi transformator yang lebih komprehensif.

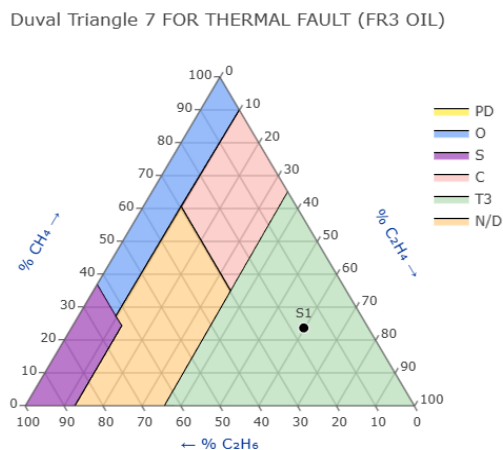
3.1.3. Hasil Duval Triangle 7

Analisis lanjutan menggunakan Duval Triangle 7 dilakukan terhadap data yang pada hasil Duval Triangle 3 berada pada zona T3, yaitu data hasil pengujian tanggal 7 Juni 2021. Sesuai metodologi penelitian, Duval Triangle 7 digunakan untuk memberikan klasifikasi yang lebih spesifik terhadap gangguan termal bertemperatur tinggi pada transformator berbasis natural ester (FR3 Oil) menggunakan parameter gas CH_4 , C_2H_4 , dan C_2H_6 . Rekapitulasi hasil diagnosis menggunakan Duval Triangle 7 disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Diagnosis Menggunakan Duval Triangle 7

No	Tanggal Pengujian	CH_4 (ppm)	C_2H_4 (ppm)	C_2H_6 (ppm)	Hasil Duval Triangle 7
1	07/06/2021	308	777	216	T3

Selanjutnya, hasil diagnosis divisualisasikan menggunakan Project STARS pada diagram Duval Triangle 7, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Plotting Duval Triangle 7

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 5 dan Gambar 4, data hasil pengujian tanggal 7 Juni 2021 berada pada zona T3. Hasil ini menunjukkan bahwa komposisi relatif gas CH_4 , C_2H_4 , dan C_2H_6

mengindikasikan gangguan termal bertemperatur tinggi (High Thermal Fault). Diagnosis tersebut konsisten dengan hasil yang diperoleh pada Duval Triangle 3, sehingga memberikan konfirmasi tambahan terhadap indikasi gangguan termal bertemperatur tinggi pada data pengujian tersebut. Konsistensi hasil antara Duval Triangle 3 dan Duval Triangle 7 menunjukkan bahwa penggunaan Duval Triangle 7 sebagai metode diagnosis lanjutan mampu memberikan konfirmasi terhadap indikasi gangguan termal yang telah teridentifikasi pada tahap diagnosis awal. Dengan demikian, hasil analisis Duval Triangle 7 memberikan konfirmasi tambahan terhadap diagnosis T3 yang diperoleh dari Duval Triangle 3.

3.2. Pembahasan Hasil Diagnosis

Untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi transformator, hasil diagnosis menggunakan Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7 dibandingkan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Hasil Diagnosis Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7

No	Tanggal Pengujian	DT3	DT6	DT7	Diagnosis Akhir
1	09/11/2020	Normal	-	-	Normal
2	07/06/2021	T3	-	T3	High Thermal Fault
3	25/10/2021	Normal	-	-	Normal
4	17/05/2022	T1	N/D	-	Low Thermal Fault
5	29/11/2022	T1	N/D	-	Low Thermal Fault
6	22/05/2023	T1	N/D	-	Low Thermal Fault

Berdasarkan Tabel 6, hasil diagnosis menunjukkan bahwa kondisi transformator selama periode pengamatan didominasi oleh gangguan termal. Dari enam data historis yang dianalisis, dua data berada pada kondisi Normal, tiga data menunjukkan indikasi Low Thermal Fault (T1), sedangkan satu data menunjukkan High Thermal Fault (T3). Tidak ditemukan indikasi gangguan listrik berupa Partial Discharge (PD), Low Energy Discharge (D1), maupun High Energy Discharge (D2) pada seluruh data yang dianalisis. Temuan ini menunjukkan bahwa pola pembentukan gas pada data yang dianalisis lebih berkaitan dengan indikasi gangguan termal dibandingkan dengan gangguan akibat pelepasan muatan listrik.

Analisis lanjutan menggunakan Duval Triangle 6 dilakukan terhadap seluruh data yang berada pada zona T1. Namun, seluruh data tersebut berada pada zona N/D (Not Determined), sehingga tidak dapat diklasifikasikan lebih lanjut berdasarkan batas zona yang tersedia pada Duval Triangle 6. Hasil ini menunjukkan bahwa indikasi Low Thermal Fault yang diperoleh dari Duval Triangle 3 belum dapat dijelaskan secara lebih spesifik menggunakan Duval Triangle 6 pada data penelitian ini. Dengan demikian, interpretasi terhadap ketiga data tersebut tetap mengacu pada hasil diagnosis awal Duval Triangle 3, yaitu T1.

Berbeda dengan hasil Duval Triangle 6, analisis menggunakan Duval Triangle 7 memberikan hasil yang konsisten dengan diagnosis awal. Data yang sebelumnya teridentifikasi sebagai T3 pada Duval Triangle 3 kembali diklasifikasikan sebagai T3 pada Duval Triangle 7. Konsistensi hasil dari kedua metode tersebut mendukung interpretasi adanya indikasi gangguan termal bertemperatur tinggi pada data pengujian tanggal 7 Juni 2021. Dengan demikian, penggunaan Duval Triangle 7 memberikan konfirmasi tambahan terhadap hasil diagnosis T3 yang diperoleh dari Duval Triangle 3.

Hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian terdahulu mengenai karakteristik Dissolved Gas Analysis (DGA) pada transformator dengan fluida isolasi natural ester. Meira et al. [15] menunjukkan bahwa karakteristik gas yang terbentuk pada natural ester akibat gangguan termal berbeda dengan minyak mineral, terutama pada gangguan temperatur rendah, dengan etana (C_2H_6) menjadi salah satu gas yang signifikan. Hal tersebut sejalan dengan tiga data pada penelitian ini yang diklasifikasikan sebagai T1 dan memiliki konsentrasi C_2H_6 sebesar 44 ppm, 47 ppm, dan 58 ppm. Rodríguez et al. [16] juga melaporkan keterkaitan pembentukan etilena (C_2H_4) dengan kondisi overheating pada natural ester serta

penggunaan Duval Triangle untuk interpretasi DGA. Temuan tersebut mendukung hasil penelitian pada data 7 Juni 2021 yang memiliki konsentrasi C_2H_4 sebesar 777 ppm dan diklasifikasikan sebagai T3 oleh Duval Triangle 3 serta dikonfirmasi oleh Duval Triangle 7. Selanjutnya, Xing et al. [18] menunjukkan melalui pengujian natural ester, termasuk FR3, bahwa C_2H_6 merupakan salah satu gas karakteristik pada gangguan termal temperatur rendah hingga menengah, sedangkan C_2H_4 dan C_2H_6 berperan pada gangguan dengan temperatur yang lebih tinggi. Hasil tersebut memperkuat temuan penelitian ini bahwa pola konsentrasi gas pada data DGA UAT #2A memiliki keterkaitan dengan indikasi gangguan termal yang diperoleh melalui Duval Triangle 3 dan Duval Triangle 7.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa Duval Triangle 3 dapat digunakan sebagai metode diagnosis awal untuk mengidentifikasi indikasi gangguan pada transformator berbasis FR3 Oil. Selanjutnya, Duval Triangle 6 dan Duval Triangle 7 digunakan sebagai metode diagnosis lanjutan sesuai dengan karakteristik gangguan yang teridentifikasi. Pada data yang dianalisis dalam penelitian ini, Duval Triangle 7 memberikan hasil yang konsisten dengan diagnosis High Thermal Fault (T3) dari Duval Triangle 3, sedangkan Duval Triangle 6 belum mampu memberikan klasifikasi lanjutan terhadap data Low Thermal Fault (T1) karena seluruh sampel berada pada zona N/D.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menerapkan metode Duval Triangle 3, Duval Triangle 6, dan Duval Triangle 7 pada Project STARS (Smart Transformer Assessment and Recommendation System) untuk mendiagnosis kondisi transformator yang menggunakan natural ester (FR3 Oil) berdasarkan data Dissolved Gas Analysis (DGA). Hasil analisis terhadap enam data historis menunjukkan bahwa dua data berada pada kondisi Normal, tiga data teridentifikasi sebagai Low Thermal Fault (T1), dan satu data teridentifikasi sebagai High Thermal Fault (T3). Tidak ditemukan indikasi gangguan listrik berupa Partial Discharge (PD), Low Energy Discharge (D1), maupun High Energy Discharge (D2) selama periode pengamatan, sehingga gangguan yang teridentifikasi didominasi oleh gangguan termal.

Analisis lanjutan menunjukkan bahwa Duval Triangle 7 mampu mengonfirmasi hasil diagnosis High Thermal Fault (T3) yang diperoleh dari Duval Triangle 3, sedangkan Duval Triangle 6 menghasilkan klasifikasi Not Determined (N/D) pada seluruh data yang berada pada zona T1,

sehingga tidak memberikan klasifikasi gangguan yang lebih spesifik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Duval Triangle 3 efektif digunakan sebagai diagnosis awal pada transformator berbasis FR3 Oil, sementara Duval Triangle 6 dan Duval Triangle 7 berperan sebagai metode diagnosis lanjutan sesuai karakteristik gangguan termal yang teridentifikasi. Implementasi ketiga metode tersebut dalam Project STARS mampu mengotomatisasi proses perhitungan, visualisasi, dan interpretasi hasil diagnosis sehingga dapat mendukung proses evaluasi kondisi transformator secara lebih cepat dan sistematis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "International Electrotechnical Commission, Mineral Oil-Filled Electrical Equipment in Service—Guidance on the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis," *IEC*, vol. 60599, no. 2022, 2022 2022.
- [2] I. E. E. E. Power and E. Society, *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Natural Ester and Synthetic Ester-Immersed Transformers*, *IEEE Std C57.155-2014*. New York, NY, USA: IEEE, 2014.
- [3] M. Duval, "A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 3, pp. 8–7, 2002 2002, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MEI.2002.1014963>
- [4] M. Duval, "The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 6, pp. 22–29, 2008 2008, doi: [10.1109/MEI.2008.4665347](http://dx.doi.org/10.1109/MEI.2008.4665347).<http://dx.doi.org/10.1109/MEI.2008.4665347>
- [5] S. A. Wani, A. S. Rana, S. Sohail, O. Rahman, S. Parveen, and S. A. Khan, "Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 111347, 2021 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.111347>
- [6] A. Nanfak, "Traditional Fault Diagnosis Methods for Mineral Oil-Immersed Power Transformer Based on Dissolved Gas Analysis: Past, Present and Future," *IET Nanodielectrics*, vol. 7, doi: <https://doi.org/10.1049/nde2.12082>
- [7] M. Duval and L. Lamarre, "The Duval Pentagon-A New Complementary Tool for the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30, no. 6, pp. 9–12, 2014 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MEI.2014.6943428>
- [8] M. Duval and J. Buchacz, "Identification of Arcing Faults in Paper and Oil in Transformers-Part I: Using the Duval Pentagons," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 38, no. 1, pp. 19–21, 2022 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MEI.2022.9648268>
- [9] S. O. Oparanti, U. M. Rao, and I. Fofana, "Natural Esters for Green Transformers: Challenges and Keys for Improved Serviceability," *Energies*, vol. 16, no. 1, Art.61, 2023 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/en16010061>
- [10] G. GÃmez, "Dissolved Gas Analysis (DGA) of Natural Ester Insulating Fluids with Different Chemical Compositions," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 3, pp. 1071–1078, 2014 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2014.6832250>
- [11] Y. Wang, "Detailed Procedures of Retrofilling Transformers with FR3 Natural Ester," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, no. 18, 2022 2022, doi: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12402>
- [12] in *IEEE Power & Energy Society, IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Insulating Liquid in Transformers*, *IEEE Std C57.147-2018*. New York, NY, USA: IEEE, 2018.
- [13] A. Montero and B. GarcÃa, "Retrofilling Mineral Oil-Immersed Transformers with Alternative Insulating Liquids: A Review," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 40, no. 3, 2024 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/MEI.2024.10721381>
- [14] "CIGRE Joint Working Group D1/A2.47, Technical Brochure 771: Advances in DGA Interpretation," 2019 2019.
- [15] C. V. Meira, R. E. Ãlvarez, and L. Catalano, "Dissolved Gas Analysis in Mineral Oil and Natural Ester Liquids from Thermal Faults," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 4, pp. 1317–1325, 2021 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2021.009334>
- [16] J. RodrÃguez, J. E. Contreras, and C. GaytÃn, "Evaluation and Interpretation of Dissolved Gas Analysis of Soybean-Based Natural Ester Insulating Liquid," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 4, pp. 1343–1348, 2021 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2021.009467>
- [17] M. S. Ali, A. H. A. Bakar, A. Omar, A. S. A. A. Jaafar, and S. H. Mohamed, "Conventional methods of dissolved gas analysis using oil-immersed power transformer for fault diagnosis: A review," *Electric Power Systems Research*, no. 109064, p. 10 1016 2022 109064, 2023 2023.
- [18] Y. Xing, Y. Hu, Y. Ma, Y. Liu, M. Dong, and Y. Xu, "Difference Analysis of Dissolved Gas in Natural Ester Insulating Fluids under Typical Electrical and Thermal Faults: An Experimental Study," *High Voltage*, vol. 8, no. 6, pp. 1206–1214, 2023 2023, doi: <https://doi.org/10.1049/hve2.12338>