

Penerapan Metode TDCG dan *Duval Triangle* untuk Diagnosis Gangguan Internal pada Transformator Distribusi

Dhany Rafiko¹, Bengawan Alfaresi^{2*}, Feby Ardianto³

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Palembang, Indonesia

*e-mail: begawan_alfarezi@um-palembang.ac.id

ABSTRAK

Transformator distribusi memiliki peran krusial dalam menjaga kontinuitas pasokan listrik, terutama pada instalasi vital seperti bandara. Penelitian ini dilaksanakan di Bandar Udara Internasional Sultan Mahmud Badaruddin II Palembang selama Januari hingga April 2025 dengan tujuan mendiagnosis kondisi internal transformator, mengetahui gangguan apa yang terjadi pada transformator dan merekomendasi tindakan menggunakan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) melalui pendekatan *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG) dan *Duval's Triangle*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada Januari dan Februari 2025, nilai TDCG berada pada Kondisi 2 (caution) yang mengindikasikan potensi gangguan internal, sedangkan analisis segitiga Duval menempatkan transformator pada zona T2 (thermal fault 300–700°C) dengan indikasi arcing akibat munculnya gas asetilen. Namun, pada Maret dan April 2025 kondisi membaik, ditunjukkan oleh penurunan nilai TDCG ke Kondisi 1 (Normal) serta pergeseran zona Duval ke T1 (thermal ringan <300°C) dengan dominasi gas metana. Berdasarkan hasil ini, transformator masih dapat beroperasi dengan baik, meskipun tetap diperlukan pemantauan berkala serta langkah-langkah perawatan preventif sesuai standar IEEE C57.104-2008 untuk menjaga keandalan dan memperpanjang umur operasional.

Kata Kunci: *Dissolved Gas Analysis*, TDCG, *Duval's Triangle*, transformator distribusi.

Application of TDCG and Duval Triangle Methods for Diagnosing Internal Faults in Distribution Transformers

ABSTRACT

Distribution transformers play a crucial role in maintaining continuity of electricity supply, especially in vital installations such as airports. This research was conducted at Sultan Mahmud Badaruddin II International Airport in Palembang from January to April 2025 with the aim of diagnosing the internal condition of transformers, identifying any disturbances occurring in the transformers, and recommending actions using the Dissolved Gas Analysis (DGA) method through the Total Dissolved Combustible Gas (TDCG) and Duval's Triangle approaches. The test results showed that in January and February 2025, the TDCG value was at Condition 2 (caution), indicating potential internal disturbances, while Duval's triangle analysis placed the transformer in zone T2 (thermal fault 300–700°C) with indications of arcing due to the emergence of acetylene gas. However, in March and April 2025, conditions improved, as indicated by a decrease in TDCG values to Condition 1 (Normal) and a shift in the Duval zone to T1 (mild thermal <300°C) with a predominance of methane gas. Based on these results, the transformer can still operate properly, although periodic monitoring and preventive maintenance measures in accordance with the IEEE C57.104-2008 standard are still required to maintain reliability and extend operational life.

Keywords: *Dissolved Gas Analysis*, TDCG, *Duval's Triangle*, distribution transformer

PENDAHULUAN

Transformator distribusi merupakan salah satu komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari jaringan distribusi menengah ke tegangan rendah



secara kontinu dan andal [1]. Dalam pengoperasian jangka panjang, transformator tidak terlepas dari berbagai gangguan internal yang disebabkan oleh faktor termal, listrik, maupun mekanis. Gangguan tersebut dapat mengakibatkan penurunan kinerja, berkurangnya keandalan sistem, hingga potensi kerusakan permanen yang berdampak pada kerugian operasional dan ekonomi yang signifikan [2].

Salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk mendeteksi gangguan internal transformator secara dini adalah Dissolved Gas Analysis (DGA). Metode ini dilakukan dengan menganalisis kandungan gas terlarut dalam minyak isolasi transformator, yang terbentuk akibat degradasi minyak dan material isolasi padat akibat stres termal dan Listrik [3]. Keunggulan DGA terletak pada kemampuannya mendeteksi gejala gangguan sejak tahap awal sebelum terjadi kegagalan besar, sehingga sangat efektif sebagai alat pemantauan kondisi transformator.

Metode Total Dissolved Combustible Gas (TDCG) digunakan untuk menilai kondisi umum transformator berdasarkan jumlah total gas mudah terbakar yang terlarut dalam minyak hasil pengujian DGA. Nilai TDCG kemudian dibandingkan dengan batasan standar IEEE C57.104-2008 untuk menentukan tingkat keparahan kondisi transformator, mulai dari kondisi normal hingga kondisi kritis yang memerlukan tindakan segera [4][5]. Metode ini memberikan gambaran awal mengenai tingkat degradasi yang terjadi di dalam transformator.

Selain itu, metode Duval's Triangle digunakan untuk mengidentifikasi jenis gangguan secara lebih spesifik dengan memanfaatkan rasio tiga gas utama, yaitu metana (CH_4), etilena (C_2H_4), dan asetilena (C_2H_2). Persentase ketiga gas tersebut diplotkan ke dalam segitiga Duval untuk menentukan klasifikasi gangguan, seperti partial discharge, overheating, maupun arcing [6]. Dengan kemampuannya mengklasifikasikan jenis gangguan secara detail, metode ini banyak digunakan dalam analisis lanjutan hasil DGA.

Kombinasi metode TDCG dan Duval's Triangle diyakini mampu menghasilkan diagnosis gangguan internal transformator yang lebih komprehensif dan akurat, karena menggabungkan penilaian kondisi umum dengan identifikasi spesifik jenis gangguan yang terjadi [7]. Pendekatan ini sangat bermanfaat dalam mendukung pengambilan keputusan terkait strategi pemeliharaan dan pencegahan kegagalan transformator.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi transformator distribusi yang beroperasi di Bandar Udara Internasional Sultan Mahmud Badaruddin II Palembang dengan menerapkan metode TDCG dan Duval's Triangle. Hasil analisis diharapkan dapat mendeteksi potensi gangguan internal secara dini serta memberikan rekomendasi perawatan yang tepat guna meningkatkan keandalan dan kontinuitas pasokan listrik [8].

Beberapa penelitian terdahulu mendukung penggunaan metode ini. Menurut Huo-Ching Sun, pengujian DGA merupakan metode paling sensitif dalam mendeteksi gangguan dini dibandingkan inspeksi visual maupun metode periodik lainnya [9]. Penelitian yang dilakukan oleh Julia Krisna menunjukkan bahwa metode Duval's Triangle lebih efektif dalam menentukan jenis gangguan pada transformator dibandingkan metode rasio konvensional [10]. Selain itu, penelitian independen oleh Jeff Golarz menyatakan bahwa metode Duval's Triangle mampu mencapai tingkat akurasi hingga 96% dalam mengidentifikasi jenis kerusakan transformator [11].

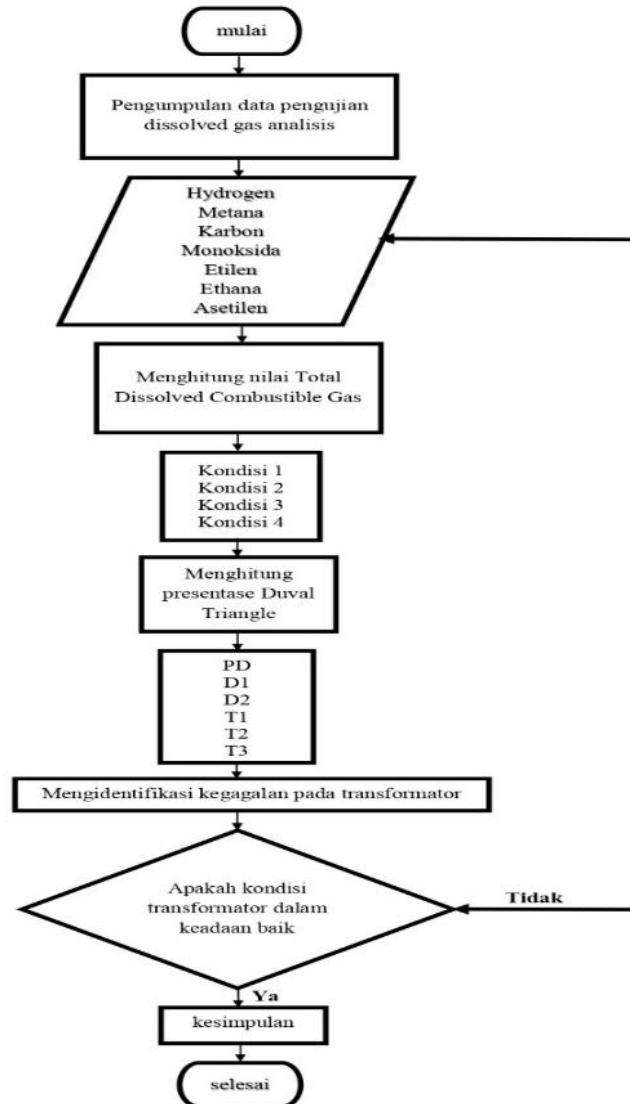
METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada sebuah transformator distribusi sebagai objek penelitian dalam rentang waktu Januari hingga April 2025. Data penelitian diperoleh melalui pengujian Dissolved Gas Analysis (DGA) menggunakan Gas Chromatography Analyzer, sebagaimana dijelaskan pada referensi [12]. Pengambilan sampel minyak transformator dilakukan secara periodik satu kali setiap bulan, sehingga diperoleh empat set data pengujian.



Prosedur pengambilan sampel dan pengujian DGA mengacu pada standar ASTM D3612, yang menjamin ketepatan dan keandalan pengukuran gas terlarut dalam minyak transformator. Gas yang dianalisis meliputi H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, dan CO. Data konsentrasi gas digunakan sebagai dasar analisis kondisi transformator..

Untuk memperjelas tahapan penelitian, diagram alir penelitian disusun sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan proses mulai dari pengambilan data DGA, pengolahan data, hingga penentuan kondisi dan jenis gangguan transformator.



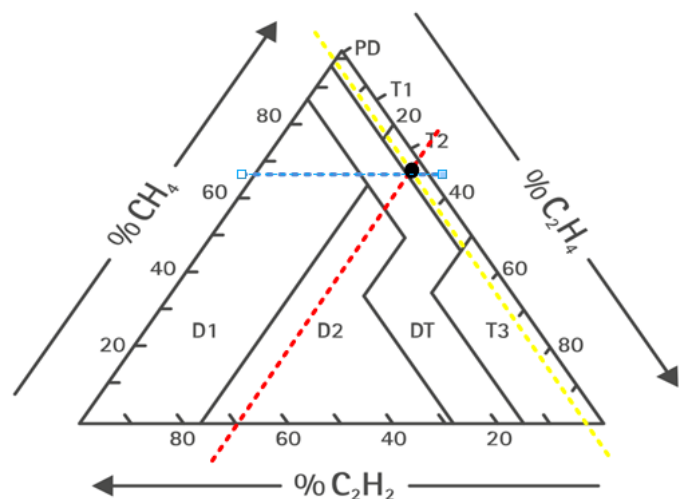
Gambar 1. Flowchart Penelitian

Analisis kondisi transformator dilakukan dengan menghitung nilai Total Dissolved Combustible Gas (TDCG), yaitu penjumlahan konsentrasi gas-gas mudah terbakar. Nilai TDCG kemudian diklasifikasikan berdasarkan standar IEEE C57.104-2008 untuk menentukan tingkat kondisi operasional transformator, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekomendasi Operasi Transformator berdasarkan TDCG [15]

| Kondisi | Level TDCG (ppm) | TDCG Rate (ppm/hari) | Interval Sampling | Prosedur Operasi |
|------------------|------------------|----------------------|-------------------|---|
| Kondisi 1 | ≤720 | >30 | Bulanan | - Analisis gas individual - Tentukan pengaruh pembebanan terhadap laju pembentukan gas |
| | | 30-Oct | Setiap 4 bulan | Operasi secara normal |
| | | <10 | Tahunan | |
| Kondisi 2 | 721-1920 | >30 | Bulanan | - Analisis gas individual - Tentukan pengaruh pembebanan terhadap laju pembentukan gas |
| | | 30-Oct | Bulanan | |
| | | <10 | Setiap 4 bulan | |
| Kondisi 3 | 1921-4630 | >30 | Mingguan | - Analisis gas Individual |
| | | 30-Oct | Mingguan | - Rencanakan pemadaman |
| | | <10 | Bulanan | - Informasikan ke pabrikan |
| Kondisi 4 | >4630 | >30 | Harian | - Pertimbangkan untuk pergantian - Informasikan kepada Pabrikan |
| | | 30-Oct | Harian | - Analisis gas individual - Rencanakan pemadaman |
| | | <10 | Mingguan | - Informasikan ke pabrikan |

Selain itu, identifikasi jenis gangguan internal dilakukan menggunakan metode Duval's Triangle [13] dengan memetakan persentase relatif gas CH₄, C₂H₄, dan C₂H₂ ke dalam segitiga Duval, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Segitiga Duval [10]

Area hasil pemetaan digunakan untuk menentukan jenis gangguan yang terjadi, dengan klasifikasi diagnosis ditunjukkan pada Tabel 2 [14]. Hasil analisis TDCG dan Duval's Triangle digunakan sebagai dasar penilaian kondisi transformator dan rekomendasi kelayakan operasinya [15].

Tabel 2. Diagnosa Fault Duval Triangle [14]

| Area | Diagnosa Fault |
|------|--|
| (PD) | <i>Partial Discharge</i> |
| (D1) | <i>Low Energy Discharge</i> |
| (D2) | <i>High Energy Discharge</i> |
| (T1) | <i>Thermal Fault Temperatur dibawah 300° C</i> |
| (T2) | <i>Thermal Fault Temperatur antara 300° C dan 700° C</i> |
| (T3) | <i>Thermal Fault Temperatur diatas 700° C</i> |

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil pengujian Dissolved Gas Analysis (DGA) pada transformator distribusi di Bandar Udara Internasional Sultan Mahmud Badaruddin II Palembang selama periode Januari hingga April 2025. Hasil pengujian konsentrasi gas terlarut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Uji DGA

| Tanggal | (H ₂) | (CH ₄) | (CO) | (C ₂ H ₄) | (C ₂ H ₆) | (C ₂ H ₂) |
|------------|-------------------|--------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 5-Jan-2025 | 239 | 19 | 391 | 8 | 67 | 0 |
| 5-Feb-2025 | 252 | 18 | 383 | 8 | 78 | 1 |
| 5-Mar-2025 | 99 | 29 | 182 | 6 | 54 | 0 |
| 5-Apr-2025 | 87 | 71 | 125 | 4 | 49 | 0 |

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa konsentrasi gas terlarut mengalami fluktuasi selama periode pengamatan. Gas hidrogen (H₂) dan karbon monoksida (CO) menunjukkan kecenderungan menurun, sedangkan gas metana (CH₄) mengalami peningkatan pada bulan April 2025. Gas asetilena (C₂H₂) terdeteksi dalam jumlah sangat kecil, yang menunjukkan tidak terjadinya gangguan pelepasan energi tinggi (arching) yang signifikan.

Analisis Menggunakan Metode Total Dissolved Combustible Gas (TDCG)

Analisis kondisi transformator dilakukan dengan menghitung nilai Total Dissolved Combustible Gas (TDCG) menggunakan persamaan berikut..

$$TDCG = CH_4 + CH_4 + CO + C_2H_4 + C_2H_6 + C_2H_2 \quad (1)$$

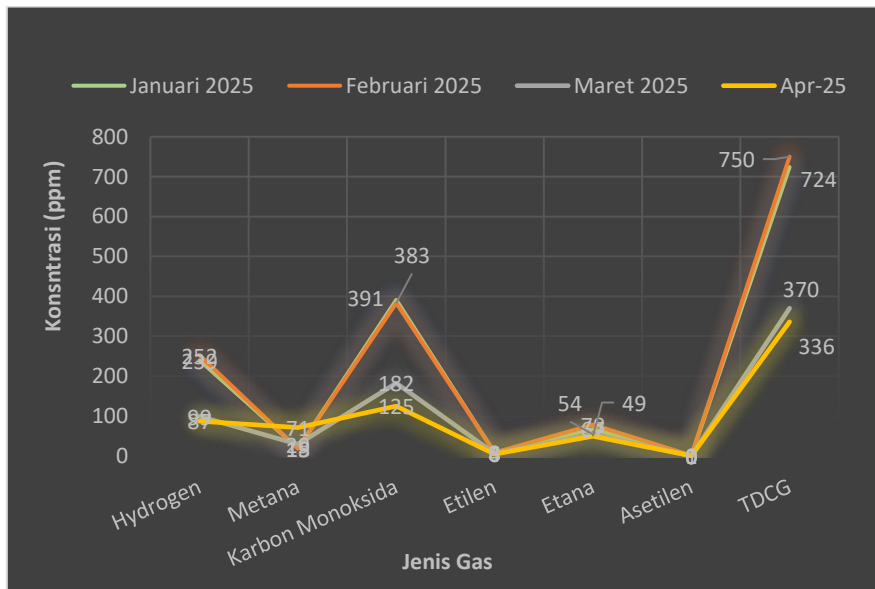
Dari perhitungan *Total Dissolved Combustible Gas* dan setelah di interpretasikan dengan standar IEEE 104-C57 2008 maka hasil kondisi transformator seperti tabel 4.

Tabel 4. Analisa TDCG

| Jenis Gas | Satuan | Total Dissolved Combustible Gas | | | |
|----------------|--------|---------------------------------|------------|------------|------------|
| | | 05/01/2025 | 05/02/2025 | 05/03/2025 | 05/04/2025 |
| H ₂ | ppm | 239 | 252 | 99 | 87 |

| | | | | | |
|-------------------------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| CH ₄ | ppm | 19 | 18 | 29 | 71 |
| CO | Ppm | 391 | 383 | 182 | 125 |
| C ₂ H ₄ | Ppm | 8 | 8 | 6 | 4 |
| C ₂ H ₆ | Ppm | 67 | 78 | 54 | 49 |
| C ₂ H ₂ | Ppm | 0 | 1 | 0 | 0 |
| TDCG | | 724 | 750 | 370 | 336 |
| Level Kondisi | | Kondisi 2 | Kondisi 2 | Kondisi 1 | Kondisi 1 |

Berdasarkan Tabel 4, nilai TDCG pada bulan Januari–Februari 2025 berada pada rentang 721–1920 ppm (Kondisi 2), yang mengindikasikan perlunya pemantauan lebih intensif. Pada bulan Maret–April 2025, nilai TDCG menurun hingga berada pada Kondisi 1 (≤ 720 ppm), yang menunjukkan bahwa kondisi transformator membaik dan berada dalam batas operasi normal. Tren perubahan konsentrasi gas terlarut ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 1. Tren Konsentrasi Gas

Berdasarkan gambar 3 tren konsentrasi gas hasil *Dissolved Gas Analysis* dari bulan Januari hingga April 2025, terlihat adanya perubahan signifikan pada beberapa jenis gas terlarut dalam minyak transformator. Gas Hydrogen (H₂) menunjukkan penurunan dari 252 ppm di bulan Februari menjadi 87 ppm pada bulan April. Penurunan ini mengindikasikan berkurangnya aktivitas pemanasan atau degradasi termal ringan pada bagian isolasi.

Sebaliknya, gas Metana (CH₄) mengalami peningkatan yang cukup signifikan dari 18 ppm di bulan Februari menjadi 71 ppm pada bulan April. Hal ini dapat menjadi indikasi adanya pemanasan lokal yang belum bersifat merusak secara besar.

Gas Karbon Monoksida (CO) yang berasal dari degradasi kertas isolasi mengalami penurunan dari 391 ppm pada bulan Januari menjadi 125 ppm pada bulan April. Penurunan ini menunjukkan bahwa tidak ada kerusakan signifikan pada bagian selulosa dan kondisi termal transformator cenderung membaik. Gas Etilen (C₂H₄) dan Etana (C₂H₆) juga mengalami penurunan bertahap, yang memperkuat bahwa tidak terjadi gangguan termal berat selama periode pengamatan.

Selain itu, gas Asetilen (C_2H_2) tetap berada pada nilai sangat rendah, yaitu 0–1 ppm, yang berarti ada aktivitas arcing atau gangguan ringan Penurunan nilai *Total Dissolved Combustible Gas* dari 750 ppm di bulan february menjadi 336 ppm di bulan April, menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kondisi transformator. Berdasarkan standar IEEE C57.104, kondisi TDCG ini mengindikasikan bahwa transformator berpindah dari Kondisi 2 ke Kondisi 1 (normal), yang berarti transformator dalam keadaan baik untuk tetap dioperasikan.

Analisa dari hasil perhitungan metode *Total Dissolved Combustible Gas* pada transformator distribusi Bandara Internasional Sultan Mahmud Badaruddin II Palembang, bisa mengambil saran prosedur yang dapat dilakukan untuk kondisi transformator yang terjadi sesuai dengan pengukuran *Total Dissolved Combustible Gas* dengan mengacu standar IEEE C57.104-2008 seperti tabel.

Analisa Data Uji *Dissolved Gas Analysis* Menggunakan Metode *Duval's Triangle*

Dari data hasil uji *Dissolved Gas Analysis* seperti yang ada pada tabel 3 maka di lakukan perhitungan menggunakan metode kedua yaitu *Duval's Triangle* untuk mengetahui presentase dari konsentrasi tiga jenis gas yaitu Metana CH_4 , Etilen C_2H_4 , dan Asetilen C_2H_2 , dengan menggunakan rumus berikut ini.

$$Total\ Gas = CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2 \quad (2)$$

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{Total\ Gas} \times 100 \quad (3)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{Total\ Gas} \times 100 \quad (4)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{Total\ Gas} \times 100 \quad (5)$$

Hasil perhitungan persentase gas disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Perhitungan Duval Triangle

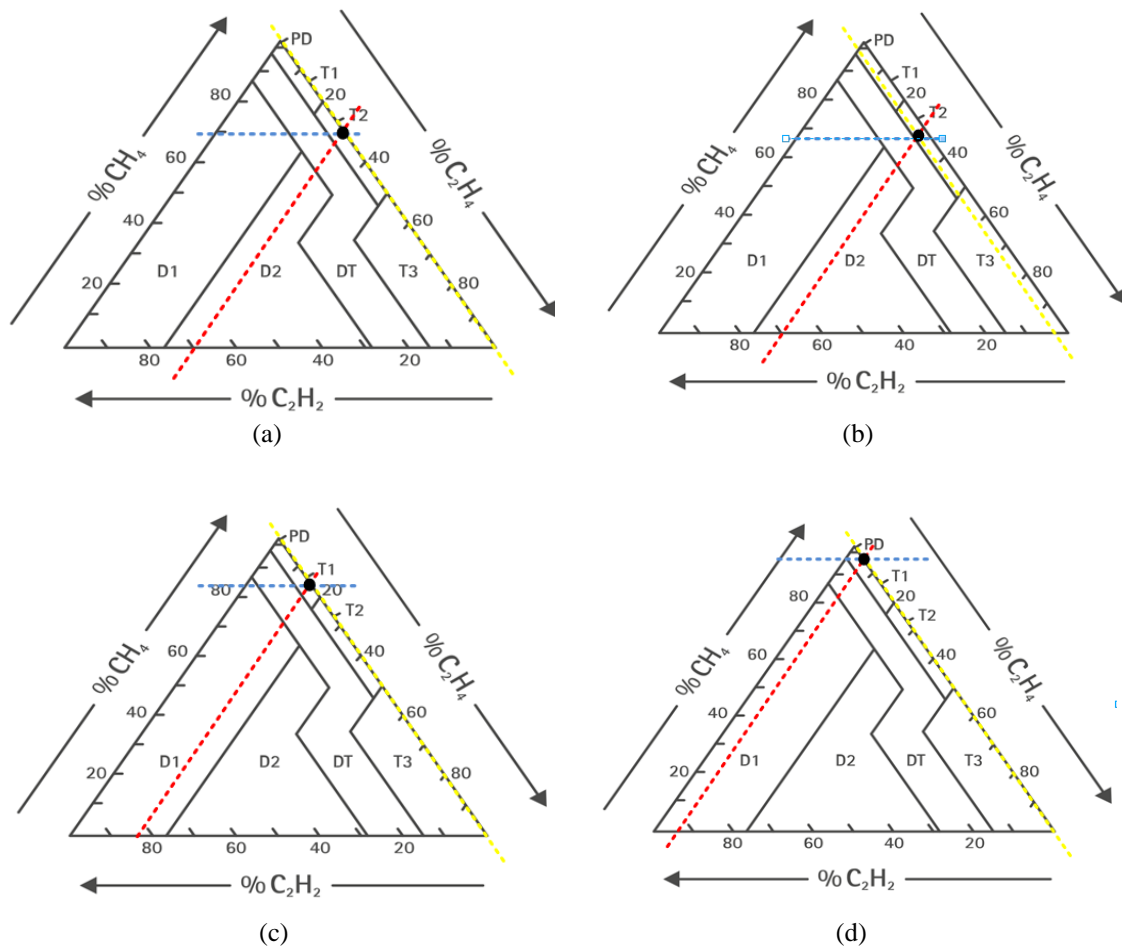
| Tanggal | (CH_4) | (C_2H_4) | (C_2H_2) | % CH_4 | % C_2H_4 | % CH_4 |
|------------|------------|--------------|--------------|----------|------------|----------|
| 5-Jan-2025 | 19 | 8 | 0 | 70% | 30% | 0% |
| 5-Feb-2025 | 18 | 8 | 1 | 67% | 30% | 4% |
| 5-Mar-2025 | 29 | 6 | 0 | 83% | 17% | 0% |
| 5-Apr-2025 | 71 | 4 | 0 | 95% | 5% | 0% |

Berdasarkan hasil pemetaan ke dalam segitiga Duval yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pada pengujian tanggal 05 Januari 2025, hasil pemetaan pada segitiga Duval seperti ditunjukkan pada Gambar 4(a) berada pada zona T2. Berdasarkan acuan IEEE C57.104-2008, kondisi ini mengindikasikan terjadinya *thermal fault* pada rentang temperatur $300^\circ C - 700^\circ C$, yang menunjukkan adanya pemanasan signifikan pada konduktor atau bagian logam transformator.

Hasil pengujian tanggal 05 Februari 2025, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4(b), masih berada pada zona T2, dengan karakteristik gangguan yang relatif sama dengan bulan Januari. Namun, pada pengujian ini terdeteksi kemunculan gas asetilena (C_2H_2) sebesar 4%, yang mengindikasikan adanya kecenderungan gangguan pelepasan energi (*arching*) pada minyak transformator. Kondisi ini menunjukkan potensi penurunan kinerja transformator apabila tidak dilakukan pemantauan lebih lanjut.

Pada pengujian tanggal 05 Maret 2025, terlihat adanya perbaikan kondisi transformator. Pemetaan segitiga Duval pada Gambar 4(c) menunjukkan pergeseran ke zona T1, yang menandakan *thermal fault* ringan dengan temperatur di bawah 300°C. Dengan konsentrasi gas terlarut yang relatif rendah, kondisi ini mengindikasikan bahwa transformator masih beroperasi dalam batas normal selama tidak terjadi peningkatan signifikan pada salah satu jenis gas.

Hasil pengujian terakhir pada 05 April 2025, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4(d), menunjukkan kondisi transformator yang semakin stabil. Meskipun persentase gas metana (CH_4) meningkat hingga 95%, nilainya masih berada dalam batas zona T1 dan diikuti oleh penurunan gas etilena (C_2H_4) hingga 5%. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa transformator berada dalam kondisi baik dan layak untuk tetap dioperasikan.



Gambar 4. Analisa Segitiga Duval (a) Januari; (b) Februari; (c) Maret; (d) April

Secara keseluruhan, hasil analisis metode TDCG dan Duval's Triangle menunjukkan adanya perbaikan kondisi transformator selama periode pengamatan, serta tidak ditemukan indikasi gangguan internal berat yang dapat mengancam keandalan operasi transformator.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian minyak transformator distribusi di Bandara Sultan Mahmud Badaruddin II Palembang menggunakan metode Total Dissolved Combustible Gas (TDCG) dan Duval's Triangle, dapat disimpulkan bahwa pada pengujian 05 Januari dan 05 Februari 2025, nilai TDCG berada pada Kondisi 2, yang mengindikasikan adanya potensi gangguan internal sehingga diperlukan perhatian dan pemantauan lebih lanjut. Pada pengujian Maret dan April 2025, nilai TDCG menurun ke Kondisi 1, yang menunjukkan adanya perbaikan kondisi transformator setelah dilakukan tindakan pembagian beban. Berdasarkan analisis menggunakan Duval's Triangle, pada pengujian Januari dan Februari 2025 transformator teridentifikasi mengalami gangguan thermal fault tipe T2, yang menunjukkan adanya pemanasan pada kisaran suhu 300°C–700°C. Kemunculan gas asetilena pada bulan Februari mengindikasikan potensi gangguan *arching* ringan pada minyak isolasi. Pada pengujian Maret dan April 2025, hasil pemetaan segitiga Duval menunjukkan pergeseran ke zona T1, yaitu gangguan termal ringan dengan temperatur di bawah 300°C, yang menandakan kondisi transformator semakin membaik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Suparmono, F. H. Gultom, C. Cholish, and T. Sitepu, "Studi Gangguan Transformator Distribusi Pada Jaringan Distribusi 20 Kv Di Pt Pln (Persero) Rayon Medan Baru," *Media Elektr.*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.26714/me.v15i1.7892.
- [2] R. Anni, A. Asran, and K. Kartika, "Analisis Keadaan Minyak Transformator Menggunakan Metode Logika Fuzzy Berdasarkan Kadar Gas Terlarut," *Urmal Pendidik. Tambusai*, vol. 6, no. 2, pp. 16200–16207, 2022, doi: 10.31004/jptam.v6i2.4966.
- [3] T. Sandiri, L. S. Patras, and M. Tuegeh, "Analysis of Transformer Condition Used Dissolved Gas Analysis (DGA)," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, pp. 1–8, 2023.
- [4] Y. Afrida and Fitriyono, "Analisa Kondisi Minyak Trafo Berdasarkan Hasil Uji Dissolved Gas Analisis Pada Trafo Daya #1 Di PT.PLN (PERSERO) GARDU INDUK KOTABUMI," *Electrician*, vol. 16, no. 3, pp. 355–358, 2022, doi: 10.23960/elc.v16n3.2408.
- [5] R. T. Pardede, E. Ezwarsyah, K. Kartika, and A. Asran, "Studi Kondisi Minyak Transformator Daya Berdasarkan Hasil Uji Dissolved Gas Analysis (Dga) Dengan Metode Total Dissolved Combustible Gas (Tdcg) Dan Metode Key Gas Di Pt.Indonesia Power Pltu Pangkalan Susu," *J. Energi Elektr.*, vol. 12, no. 2, p. 13, 2023, doi: 10.29103/jee.v12i2.13519.
- [6] S. Permana, S. Sumarto, and W. S. Saputra, "Analysis of Transformer Conditions using Triangle Duval Method," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 384, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/384/1/012065.
- [7] I. M. T. Sismantara, W. G. Ariastina, and A. A. N. Amrita, "Penentuan Kondisi Transformator Berdasarkan Kandungan Gas Terlarut Menggunakan Metode Segitiga Duval," *J. SPEKTRUM*, vol. 8, no. 1, p. 107, 2021, doi: 10.24843/spektrum.2021.v08.i01.p12.
- [8] M. Ansori, "Analisa kinerja minyak trafo berdasarkan hasil uji DGA dengan metode TDCG di PLTU Muara Karang," *JREEC (Journal of Renewable Energy and Electronic Control)*, vol. 3, no. 1, hlm. 27–34, 2023, doi: 10.31284/j.jreec.2023.v3i1.
- [9] H. C. Sun, Y. C. Huang, and C. M. Huang, "A review of *Dissolved Gas Analysis* in power transformers," *Energy Procedia*, vol. 14, no. 2011, pp. 1220–1225, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.1079.
- [10] J. Krisna *et al.*, "Perbandingan Metode Roger's Ratio dan Metode *Duval's Triangle* Terhadap Kegagalan Transformator," *Ijccs*, vol. 14, No.1, pp. 1–5, 2020.

- [11] J. Golarz, “Understanding dissolved gas analysis (DGA) techniques and interpretations,” *Municipal Information Network*, vol. 19, no. 6, hlm. 1–8, 2015. [Online]. Available: Electric Energy Online
- [12] R. Oktaviani dan Y. M. Simanjutak, “Analisis penggunaan DGA menggunakan metode chromatography gas sebagai indikasi kegagalan minyak isolasi transformator GI 150 kV Kotabaru,” *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology*, vol. 8, no. 2, 2020
- [13] IEEE, *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*, IEEE Standard C57.104-2019, 2019
- [14] IEEE, *IEEE Standard for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.104-2008*, 2008
- [15] PT PLN (Persero), *Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga*, No. 0520-2.K/DIR/2014, Jakarta, 2014

