

## Analisa dan Pengujian Kenaikan Suhu pada Minyak Ester Sintetis pada Transformator Distribusi 20/0,4 kV Kapasitas Daya 2500 kVA

Achmad Sutowo<sup>1</sup>, Agus Sofwan<sup>2</sup>, Baskoro Abie Pandowo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Alumni Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Sains dan Teknologi Nasional

<sup>2,3</sup> Prodi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Sains dan Teknologi Nasional  
Jl. Moh. Kahfi II, Jagakarsa, Jakarta Selatan, Indonesia, 12640

Email : [1ir\\_sutowo@yahoo.com](mailto:1ir_sutowo@yahoo.com), [2asofwan@istn.ac.id](mailto:2asofwan@istn.ac.id), [3baskoro@istn.ac.id](mailto:3baskoro@istn.ac.id)

---

### Abstrak

Transformator merupakan peralatan Listrik yang digunakan sebagai penaik dan penurun tegangan pada system arus bolak balik (AC) baik satu fasa maupun tiga fasa. Peralatan tersebut terbangun oleh beberapa komponen utama seperti inti besi, belitan dan cairan pendingin atau yang sering disebut dengan minyak trafo. Minyak trafo sendiri berfungsi sebagai pendingin belitan primer sekunder dan sebagai isolasi antar belitan. Namun seiring dengan pembebanan yang tinggi, umur trafo maka suhu dan performa minyak trafo cenderung turun. Penelitian ini dilakukan dengan metode adalah menguji besar kenaikan suhu minyak tertinggi atau dengan istilah *top-liquid temperature* dan *top-liquid temperature rise* pada trafo distribusi dengan skema berdasarkan standar IEC 60076-2-2011 yang dilakukan pengujian dengan cara injeksi arus pada sisi primer sedangkan sisi sekunder dihubungkan singkat. Kenaikan suhu rata-rata dari minyak isolasi, khususnya di bagian atas transformator (*top liquid temperature rise*), saat beroperasi di atas suhu ambien. Metrik ini lebih fokus pada kenaikan suhu yang terjadi di bagian atas transformator, yang seringkali merupakan area di mana suhu cenderung lebih tinggi karena efek termal dari proses operasi transformator. Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa besarnya pada uji suhu tertinggi ( $\theta_0$ ) minyak terhadap waktu dengan kondisi tunak suhu tertinggi *top-liquid temperature* sebesar 83,2°C dan , dan hasil pengujian suhu kenaikan ( $\Delta\theta_0$ ) minyak terhadap waktu ketika kondisi keadaan tunak *top-liquid temperature rise* pada suhu sebesar 54,47 °C. Hasil ini menunjukkan terjadi perubahan yang cukup signifikan.

**Kata kunci:** *top-liquid temperature, top-liquid temperature rise, keadaan tunak*

### Abstract

*A transformer is an electrical equipment that is used to increase and decrease voltage in alternating current (AC) systems, both single phase and three phase. This equipment is made up of several main components such as iron cores, windings and cooling fluid or what is often called transformer oil. Transformer oil itself functions as a coolant for the primary secondary winding and as insulation between windings. However, as the load increases and the transformer ages, the temperature and performance of the transformer oil tends to decrease. The average temperature rise of the insulating oil, especially at the top of the transformer (top liquid temperature rise), when operating above ambient temperature. This metric focuses more on the temperature rise that occurs at the top of the transformer, which is often the area where temperatures tend to be higher due to the thermal effects of the transformer operating process. The aim of this research is to test the highest oil temperature rise or the terms top-liquid temperature and top-liquid temperature rise in a distribution transformer with a scheme based on the IEC 60076-2-2011 standard which is tested by means of current injection on the primary side while the secondary side is connected short. The results obtained state that the steady state top-liquid temperature is 83.2°C and the top-liquid temperature rise is 54.47°C. These results show that there has been quite a significant change.*

**Keywords:** *top-liquid temperature, top-liquid temperature rise, steady state*

## 1. Pendahuluan

Sejak abad ke dua puluh listrik arus bolak balik telah ditemukan. Arus bolak balik (AC) memiliki keuntungan dibandingkan dengan arus searah (DC) yang mana salah satunya adalah listrik AC dapat dengan mudah dinaikkan dan diturunkan tegangannya dengan menggunakan transformator. Dengan adanya transformator maka kebutuhan listrik AC dengan variasi tegangan dapat terpenuhi sesuai dengan beban yang ditanggungnya. Transformator memiliki beberapa bagian komponen penting didalamnya diantaranya adalah bagian kumparan dan inti besi. Pada bagian inti besi yang berperan sebagai mengalirnya fluks yang dihasilkan oleh arus listrik disebuah kumparan, yang mana inti besi dari transformator tersebut terdiri dari lempengan baja tipis yang terpadu menjadi satu bagian untuk mengurangi panas yang disebabkan oleh arus, dan kumparan yang berfungsi sebagai penghantar arus. Pada transformator terdapat dua buah kumparan yaitu, kumparan primer dan sekunder. Sesuai dengan hukum faraday tentang induksi tegangan maka tegangan akan terinduksikan dari kumparan primer ke kumparan sekunder (Junaidi, 2008).

Dalam transformator selain dua komponen tersebut terdapat material berbentuk zat cair yang berfungsi sebagai pendingin dan isolasi yaitu minyak transformator. Minyak tersebut berperan aktif dalam melindungi transformator dari pemanasan berlebih yang diakibatkan oleh kumparan dan inti besi (Melka *et al.*, 2023). Penelitian mengenai studi tegangan tembus pada transformator dengan pendingin berupa minyak dilakukan untuk mengetahui performa isolasi cair tersebut dengan memiliki beberapa skema pengujian mulai dari variasi suhu, kandungan air pada minyak tersebut yang diuji didalam sebuah wadah pengujian minyak transformator dengan jarak celah tertentu, dengan jenis minyak berupa Shell Diala-B dan Nynas (Fachrurrozi *et. al.*, 2019; Koo *et al.* 2012).

Selain menggunakan minyak tersebut beberapa penelitian mencoba mengganti jenis minyak dengan pelumas SAE 40 untuk mengetahui tegangan tembus ketika

suhu minyak mengalami kenaikan dengan hasil semakin meningkat suhu maka tegangan tembus semakin tinggi (Liu, *et al.* 2019). Penggunaan minyak mineral dan ester alami sebagai pendingin transformator, yaitu dilakukan dengan melihat suhu titik panas diukur menggunakan sensor suhu berbasis serat optik, kemudian yang hasilnya akan di plot kedalam kurva dan dibandingkan dengan standar IEEE (Guo *et al* 2023, 60076-2-2011, 2003; Winanta *et. al.* 2019). Penggunaan ONAF (oil natural air force) pada pendinginan transformator sudah banyak digunakan. Penggunaan tersebut kerusakan pada kipas sering terjadi, maka diusulkan pendeteksian kerusakan dari kipas tersebut tanpa memasang sensor, metode yang digunakan dengan pemantauan TOT (top oil transformer) yang mana dalam metode ini eksponen minyak yang dimodelkan dan dianalisis, data eksponen minyak dipantau secara real-time menggunakan pso (particel swam optimazion) atau menggunakan teknologi pengindraan ultrasonic (Jumardin and Salim, 2019; Wang *et. al.* 2021).

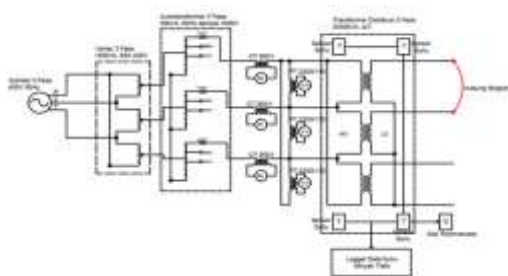
Penelitian tentang pengembangan metode untuk prediksi titik suhu panas pada minyak transformator telah dilakukan berdasarkan perhitungan medan termal fluida dengan model pembelajaran menggunakan machine learning support vector regression yang data diambil dari dua puluh sampel uji kenaikan suhu (Akbari and Zare, 2021; Li *et. al.* 2021), atau menganalisa kenaikan suhu secara akurat untuk mengetahui titik panas dengan metode hibrid dimensionless least-squares finite element method dan upwind finite element method dengan bantuan perangkat lunak computational fluid dynamic (Fauzi *et al.*, 2017; Duan, 2022), dan juga dengan membuat pemodelan komputasi untuk melihat fenomena termal, aliran, dan elektromagnetik untuk menentukan titik panas didalam tangki transformator (Singgih and Berahim, 2009; Calil *et. al.* 2020).

Pada penelitian ini bertujuan untuk melihat kenaikan suhu minyak transformator tertinggi dan kenaikan suhu rata-rata ketika dilakukan pengujian

dengan pembebanan transformator sebesar 4,7% dari tegangan nominal 20 KV dengan kapasitas daya 2500 KVA yang dilakukan selama 17 jam dengan koneksi trafo pada sisi sekunder yang dihubungkan singkat, kemudian data kenaikan suhu tersebut direkam oleh data logger hingga keadaan tunak.

## 2. Metode Penelitian

Pada tahap penelitian ini yang digagas akan dibagi menjadi dua bagian, yaitu tahap analisa data tentang persamaan kenaikan suhu minyak, kenaikan rata-rata ketika *steady state*, kenaikan dan rata-rata suhu minyak ketika selama satu jam diinjeksi arus nominal sesuai dengan standar iec 60076-2-2011. Pada Gambar 1 merupakan skema pengujian minyak transformator yang akan dilakukan dalam penelitian ini.



**Gambar 1.** Skema Pengujian Minyak Transformator

Gambar 1 merupakan skema uji minyak transformator distribusi dengan kapasitas daya 2500kVA, 20kV/0,4kV, dengan system pendingin ONAN (*Oil Natural Air Natural*), hubungan delta- bintang dengan nilai *losses* tanpa beban sebesar 2048W dan *losses* berbeban 40843,56W. Skema pengujian sesuai dengan standar IEC IEC 60076-2-2011 dimana metode hubung singkat yang digunakannya. Tegangan dari system tiga fasa diatur dengan menggunakan variac tiga fasa kemudian dilakukan *step up* tegangan mencapai 1kV, kemudian arus dan tegangan sisi primer diukur menggunakan CT (*current transformer*), PT (*potential transformer*). Selama pengujian berlangsung sisi sekunder dilakukan hubung singkat, kemudian trafo dikenakan arus uji sesuai dengan yang dihitung rugi daya total. Suhu minyak dilakukan pencuplikan data selama tujuh

belas jam kemudian data disimpan dalam *data logger*.

### A. Suhu Tertinggi Cairan/Minyak (Top-Liquid Temperature)

Tranformator memiliki cairan berupa minyak yang difungsikan sebagai peredam panas pada trafo tersebut. Ketika transformator mencatu sebuah beban, maka kenaikan arus pada trafo tersebut akan meningkat. Dengan peningkatan suhu minyak/cairan trafo tersebut maka dalam standar IEC 60076-2-2011 diatur tentang kenaikan tertingginya. Dalam standar tersebut pada bagian ini suhu minyak tertinggi atau lebih dikenal *top-liquid temperature* ( $\theta_0$ ) ini ditentukan proses pengujian dan pengukurannya. Pembacaan suhu dengan cara memasang sensor pada bagian dalam transformator dengan cara direndam pada cairan/ minyak dibagian atas tangki. Pada kenaikan suhu tertinggi minyak/cairan trafo atau *top-liquid temperature rise* ( $\Delta\theta_0$ ) dapat diperoleh dari perbedaan suhu cairan/minyak tertinggi yang diukur ( $\theta_0$ ) pada akhir masa pengujian dengan memperhitungkan kerugian/*losses* total dan eksternal suhu pendingin pada akhir pengujian( $\theta_a$ ) yaitu dengan persamaan (Deng *et al.*, 2019):

$$\Delta\theta_0 = \theta_0 - \theta_a \quad (1)$$

Untuk besarnya rata-rata kenaikan suhu/*average liquid temperature rise* ( $\Delta\theta_{0m}$ ) ditentukan oleh perbedaan antara rata-rata suhu/*average liquid temperature* ( $\theta_{0m}$ ) dan eksternal pendinginan ( $\theta_a$ ), adalah:

$$\Delta\theta_{0m} = \theta_{0m} - \theta_a \quad (2)$$

Untuk kenaikan suhu cairan terendah/*bottom-liquid temperature rise* ( $\Delta\theta_b$ ) ditentukan oleh perbedaan antara suhu cairan terendah dengan eksternal pendinginan ( $\theta_a$ ), adalah:

$$\Delta\theta_b = \theta_b - \theta_a \quad (3)$$

Suhu cairan yang berbeda adalah rata-rata pembacaan satu jam terakhir dengan total kerugian.

### B. Koreksi Kenaikan Suhu Minyak/Cairan

Pada tahap koreksi kenaikan suhu ini merupakan hasil kalkulasi dari besarnya suhu minyak tertinggi dikurang dengan suhu eksternal yang kemudia dikalikan dengan nilai daya atau arus yang diinjeksikan ke transformator. Jika menggunakan nilai daya maka seberapa besar nilai total rugi daya yang dikalikan dengan persamaan (1). Maka menurut standar IEC 60076-2-2011 persamaan rugi daya tersebut ditentukan sebagai berikut:

$$\left( \frac{\text{Total Rugi Daya}}{\text{Rugi Daya Pengujian}} \right)^x \quad (4)$$

Untuk besarnya nilai kenaikan suhu rata-rata pada belitan trafo terhadap suhu minyak rata-rata ketika trafo dalam keadaan tidak beroperasi adalah:

$$\left( \frac{\text{Rating Arus Nominal}}{\text{Arus Pengujian}} \right)^y \quad (5)$$

Sedangkan untuk besarnya kenaikan suhu titik panas tertinggi pada belitan trafo suhu belitan titik panas ketika trafo dalam keadaan tidak beroperasi:

$$\left( \frac{\text{Rating Arus Nominal}}{\text{Arus Pengujian}} \right)^z \quad (6)$$

Dimana nilai x, y, dan z merupakan nilai ekponen dalam kenaikan suhu selama pengujian dalam kondisi tunak (*steady state*) dan nilai x merupakan konstatnta yang telah ditentukan berdasarkan jenis pendinginan transformator. Tabel 1 merupakan nilai konstanta yang telah ditetapkan pada standar IEC 60076.

**Tabel 1.** Nilai Eksponen Koreksi Hasil Uji Kenaikan Suhu

	Trafo Distribusi	Trafo dengan Daya Menengah dan Tinggi			
	ONAN	ONAN	ONAF	OF..	OD..
A	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
B	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0
C	-	1,6	1,6	1,6	2,0

Dimana:

- A = merupakan eksponen x (untuk suhu teratas)
- B = merupakan eksponen y (untuk suhu belitan rata-rata)
- C = merupakan eksponen z (untuk gradien suhu belitan)
- ONAN = *Oil Natural Air Natural* (sistem pendinginan trafo)
- ONAF = *Oil Natural Air Force* (sistem pendinginan trafo)
- OF = *Oil Forced*
- OD = *Oil Directed*

Dari persamaan (1) jika disubtitusikan ke persamaan (4) maka, besarnya suhu rata-rata kenaikan tertasa adalah:

$$\Delta\theta_0 = \theta_0 - \theta_a \left( \frac{\text{Total Rugi Daya}}{\text{Rugi Daya Pengujian}} \right)^{0,8} \quad (7)$$

Tabel 1 merupakan nilai konstanta yang dipakai untuk pengujian kenaikan suhu dengan rating daya transformator minimal 2500kVA atau diatas rating daya tersebut.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini hasil perhitungan dan pengujian minyak transformator dengan uji kenaikan suhu transformator dibahas berikut ini. Tabel 2 menunjukkan data *nameplate* dari transformator yang digunakan.

**Tabel 2.** Data *Nameplate* Transformator

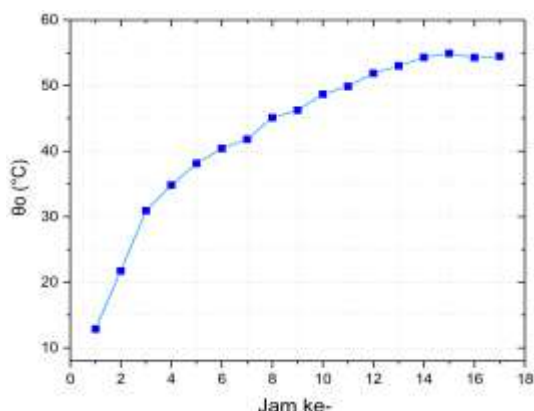
Tegangan Primer	:	20 kV
Tegangan Sekunder	:	400 V
Jumlah Fasa	:	3
Kapasitas Daya	:	2500 kVA
Frekuensi	:	50Hz
Vektor Group	:	Dyn-5
Rating Arus Primer	:	72,17 A
Rating Arus Sekunder	:	3608,44 A
Tipe Pendingin	:	ONAN

Skema pengujian dilakukan dengan cara belitan tarnsformator sisi primer diinjeksikan arus nominal sebesar 72,168A dengan pengujian yaitu besar

rating arus primer 72,16A, maka dengan persamaan (1) yang disubstitusikan kedalam persamaan (5) menjadi:

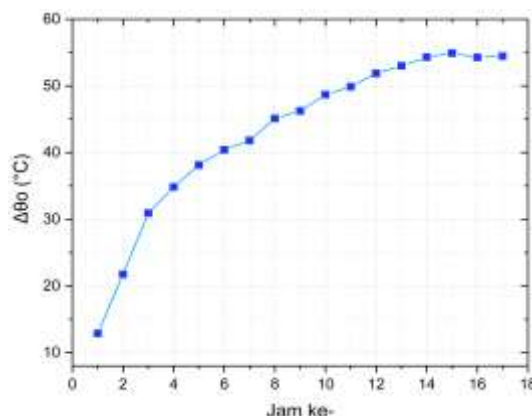
$$\Delta\theta_0 = \theta_0 - \theta_a \left( \frac{\text{Total Rugi Daya}}{\text{Rugi Daya Pengujian}} \right)^{1,6} \quad (8)$$

Dengan menggunakan Persamaan (7) yang mana jika nilai suhu tertinggi minyak ( $\theta_0$ ) sebesar 67,6°C dan eksternal suhu pendingin/*ambient average* ( $\theta_a$ ) sebesar 30,37°C, maka kenaikan suhu minyak sebesar 37,24°C. Pengujian suhu tertinggi minyak ( $\theta_0$ ), suhu kenaikan tertinggi ( $\Delta\theta_0$ ), dan suhu kenaikan rata-rata tertinggi ( $\Delta\theta_{01}$ ) dilakukan selama 16 jam dengan trafo sisi primer diberi tegangan 4,7% dari tegangan nominal sisi primer. Berikut merupakan grafik pengujian suhu tertinggi minyak terhadap waktu mencapai keadaan *steady state*.



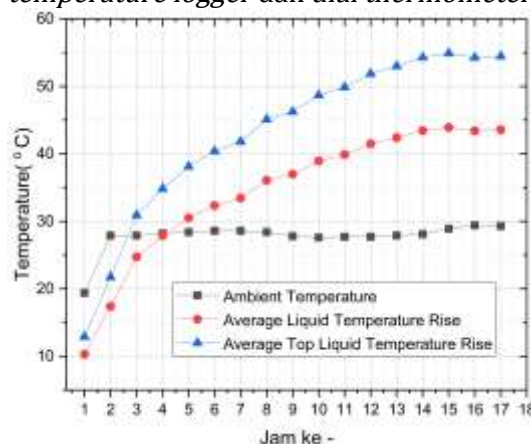
**Gambar 2.** Grafik Pengujian Suhu Tertinggi ( $\theta_0$ ) Minyak Terhadap Waktu

Pada Gambar 2 menunjukkan grafik fungsi kenaikan suhu tertinggi minyak trafo terhadap waktu pengujian selama tujuh belas jam. Pengujian dilakukan mencapai titik temperature teratas dengan kondisi keadaan tunak. Dalam keadaan tersebut suhu mencapai keadaan tunak pada suhu 83,2°C. Selanjutnya adalah pengujian suhu minyak rata-rata tertinggi dengan waktu pengujian mencapai tujuh belas jam yang ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 3.** Grafik Pengujian Suhu Kenaikan ( $\Delta\theta_0$ ) Minyak Terhadap Waktu

Gambar 3 menunjukkan bahwa suhu kenaikan yang secara teoritis berasal dari persamaan (7) kemudian dilakukan plotting grafik dengan fungsi waktu selama tujuh belas jam mencapai kondisi keadaan tunak dengan suhu tertinggi di suhu 54,47 °C. Gambar 3 dan Gambar 5 merupakan hasil dokumentasi pengukuran suhu minyak transformator menggunakan *temperature logger* dan *dial thermometer*.



**Gambar 4.** Grafik Perbandingan Suhu Kenaikan ( $\Delta\theta_0$ ) Minyak Terhadap Waktu

Gambar 4. menunjukkan kondisi udara dilingkungan pengujian relatif stabil 27,75 °C. Pada awal pengujian menunjukkan suhu 19,4 °C. Kenaikan suhu rata-rata dari minyak isolasi di seluruh transformator saat beroperasi di atas suhu ambien menunjukkan pola kenaikan yang sesuai berdasarkan standar IEC 60076-2-2011. Metrik ini mencerminkan kenaikan suhu secara keseluruhan pada minyak di seluruh bagian transformator, termasuk pada bagian tengah atau bagian bawah. Sedangkan kenaikan suhu rata-rata dari minyak isolasi, khususnya di bagian atas

transformator (top liquid temperature rise), saat beroperasi di atas suhu ambien. Metrik ini lebih fokus pada kenaikan suhu yang terjadi di bagian atas transformator, yang seringkali merupakan area di mana suhu cenderung lebih tinggi karena efek termal dari proses operasi transformator. Dari Gambar 4 tersebut jelas terlihat bahwa kondisi diatas memiliki kenaikan yang lebih besar dibandingkan di area yang lain.



**Gambar 5.** Hasil Pengukuran Menggunakan *Thermometer Logger*



**Gambar 6.** Hasil Pengukuran Menggunakan *Dial Thermometer*

Pada Gambar 5 dan Gambar 6 pengukuran suhu minyak trafo yang dilakukan pengambilan *sample* selama tujuh belas jam. Hasil tersebut merupakan pengukuran ketika suhu dalam kondisi keadaan tunak dengan suhu terbaca 83,2°C.

#### 4. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, analisa dan uji kenaikan suhu minyak transformator sesuai standar IEC 60076-2 menunjukkan hasil bahwa pada uji suhu tertinggi ( $\theta_0$ ) minyak terhadap waktu dengan kondisi tunak suhu tertinggi mencapai 83,2°C, dan hasil pengujian suhu

kenaikan ( $\Delta\theta_0$ ) minyak terhadap waktu dengan suhu 54,47 °C ketika kondisi keadaan tunak. Terjadi perubahan suhu tercapai yang cukup signifikan.

#### Daftar Pustaka

- Akbari M. and Rezaei-Zare A., 2021 "Transformer Bushing Thermal Model for Calculation of Hot-Spot Temperature Considering Oil Flow Dynamics," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 36, no. 3, pp. 1726–1734, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3014064.
- Calil V., Salazar P. D. P., De Melo A. S., and Costa E. C. M., 2020, "An Efficient Procedure for Temperature Calculation of High Current Leads in Large Power Transformers," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 222371–222376, Oct. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044713.
- Deng Y. *et al.*, 2019, "A Method for Hot Spot Temperature Prediction of a 10 kV Oil-Immersed Transformer," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107380–107388, Jun. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924709.
- Duan R., 2022, "Real-Time Hotspot Tracing and Model Analysis of a Distributed Optical Fiber Sensor Integrated Power Transformer," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 57242–57254, May 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3177844.
- Fauzi A. *et al.*, 2017, "Detection of Power Transformer Fault Conditions using Optical Characteristics of Transformer Oil," in *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics, ICP 2018*, 2018, pp. 2017–2019. doi: 10.1109/ICP.2018.8533173.
- Fachrurrozi D. B., Hadi S. P., and Wijaya D.F., 2019, "Effect of temperature change of liquid isolator based on composite diala b oil and palm oil as transformer oil," *2019 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ICOIACT 2019*, pp. 789–793, 2019, DOI: 10.1109/ICOIACT46704.2019.8938485.
- Guo Y., Sun Z. Zhang G. Gu X. Yang and D. He, 2023, "A Transformer Hot Spot Fault Diagnosis Method Combining Ultrasonic Sensing Technology and

- PSO-SVM Algorithm,” *Proc. - 2023 Int. Conf. Power Syst. Technol. Technol. Adv. Constr. New Power Syst. PowerCon 2023*, no. September, pp. 1–4, Sep. 2023, doi: 10.1109/PowerCon58120.2023.10331236.
- Junaidi**, 2008, “Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Tegangan Tembus Pada Bahan Isolasi Cair,” *Teknoin*, vol. 13, no. 2, pp. 1–5, Dec. 2008, doi: 10.20885/teknoin.vol13.iss2.art1.
- Jumardin, Ilham J., and Salim S.**, 2019, “Studi Karakteristik Minyak Nilam Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Transformator,” *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 40–48, 2019, doi: 10.37905/jjee.v1i2.2881.
- Kweon, K. Koo, J. Woo, and Y. Kim**, 2012, “Hot spot temperature for 154 kV transformer filled with mineral oil and natural ester fluid,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 3, pp. 1013–1020, Jun. 2012, doi: 10.1109/TDEI.2012.6215107.
- Li L., Wang Z., Zhang J., Ni Z., and Tan R.**, 2021, “Temperature Rise Test and Thermal-Fluid Coupling Simulation of an Oil-Immersed Autotransformer under DC Bias,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32835–32844, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060632.
- Liu G., Zheng Z., Ma X., Rong S., Wu W., and Li L.**, 2019, “Numerical and Experimental Investigation of Temperature Distribution for Oil-Immersed Transformer Winding Based on Dimensionless Least-Squares and Upwind Finite Element Method,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 119110–119120, Aug. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937548.
- 60076-2-2011**, 2003, *International Electrotechnical Commission*, Vol. 2003.
- Melka et al.**, 2023, “Effective Cooling of a Distribution Transformer Using Biodegradable Oils at Different Climate Conditions,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 30, no. 4, pp. 1557–1565, Aug. 2023, doi: 10.1109/TDEI.2023.3282561.
- Singgih N. and Berahim H.**, 2009, “Analisis Pengaruh Keadaan Suhu Terhadap Tegangan Tembus AC Dan DC Pada Minyak Transformator,” *J. Tek. Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 93–99, 2009.
- Wang L., W. Zuo, Z. X. Yang, J. Zhang, and Z. Cai**, 2021, “A Method for Fans’ Potential Malfunction Detection of ONAF Transformer Using Top-Oil Temperature Monitoring,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 129881–129889, Sep. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114301.
- Winanta N.O., Amrita A. A. N., and Ariastina W. G.**, 2019, “Studi Tegangan Tembus Minyak Transformator,” *J. SPEKTRUM*, vol. 6, no. 3, p. 10, Oct. 2019, doi: 10.24843/spektrum.2019.v06.i03.p02.