

Studi Analisis Tahanan Isolasi dan Estimasi Umur Transformator Menggunakan Metode Health Index di PT PLN (Persero) UPT Cawang

Study of Insulation Resistance Analysis and Transformer Life Estimation Using the Health Index Method at PT PLN (Persero) UPT Cawang

Juanto Sirait¹, Teguh A Nugroho², Soni Prayogi*³

^{1,2,3} Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pertamina, Jalan Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220, Jakarta. Indonesia

E-mail: ¹ 1990juanto@gmail.com, ² teguh.an@universitaspertamina.ac.id,

³ soni.prayogi@universitaspertamina.ac.id

***Corresponding author**

Abstrak

Keandalan operasi transformator sangat tergantung pada kondisi isolasi yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tahanan isolasi dan mengestimasi umur transformator dengan menggunakan metode Health Index di PT PLN (Persero) UPT Cawang. Metode Health Index ini mengintegrasikan berbagai parameter kondisi transformator, termasuk hasil pengukuran tahanan isolasi, pengujian minyak isolasi, dan parameter operasional lainnya, untuk memberikan gambaran komprehensif tentang kondisi kesehatan transformator. Data diperoleh dari pengujian lapangan dan laboratorium yang dilakukan secara periodik. Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa transformator memiliki nilai tahanan isolasi yang mendekati batas minimal yang direkomendasikan, mengindikasikan adanya penurunan kualitas isolasi. Estimasi umur transformator dilakukan berdasarkan nilai Health Index yang dihitung, dengan mempertimbangkan degradasi material isolasi dan kondisi operasional transformator. Transformator dengan nilai Health Index yang rendah diidentifikasi memiliki risiko tinggi terhadap kegagalan operasional dan memerlukan tindakan pemeliharaan atau penggantian segera. Studi ini memberikan wawasan penting bagi manajemen pemeliharaan di PT PLN (Persero) UPT Cawang untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi operasi transformator. Implementasi metode Health Index terbukti efektif dalam memprediksi umur sisa transformator dan merencanakan strategi pemeliharaan preventif. Dengan demikian, dapat diharapkan peningkatan kontinuitas layanan penyaluran energi listrik dan pengurangan risiko gangguan operasional.

Kata kunci: Estimasi Umur, Health Index, Pemeliharaan Preventif, Tahanan Isolasi, Transformator.

Abstract

The reliability of transformer operation is highly dependent on good insulation conditions. This research aims to analyze insulation resistance and estimate transformer life using the Health Index method at PT PLN (Persero) UPT Cawang. This Health Index method integrates various transformer condition parameters, including the results of insulation resistance measurements, insulating oil testing, and other operational parameters, to provide a comprehensive picture of the transformer's health condition. Data obtained from field and laboratory tests carried out periodically. The analysis results show that several transformers have insulation resistance values that are close to the recommended minimum limit, indicating a decrease in insulation quality. Transformer life estimation is carried out based on the calculated Health Index value, taking into account the degradation of the insulation material and the operational conditions of the transformer. Transformers with a low Health Index value are identified as having a high risk of operational failure and require immediate maintenance or replacement. This study provides important insights for maintenance management at PT PLN (Persero) UPT Cawang to improve the reliability and efficiency of transformer operations. Implementation of the Health Index

method has proven effective in predicting the remaining life of transformers and planning preventive maintenance strategies. In this way, it can be hoped that the continuity of electrical energy distribution services will increase and the risk of operational disruption will be reduced.

Keywords: Life Estimation, Health Index, Preventive Maintenance, Insulation Resistance, Transformer.

1. PENDAHULUAN

Transformator adalah salah satu komponen paling krusial dalam sistem distribusi tenaga listrik [1]. Fungsinya untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik sehingga energi dapat disalurkan secara efisien dari pusat pembangkit listrik hingga ke konsumen akhir [2]. Keandalan operasi transformator secara langsung mempengaruhi kontinuitas dan stabilitas penyaluran energi Listrik [3]. Mengingat pentingnya peran transformator dalam sistem tenaga Listrik [4], menjaga kondisi optimal dan memperpanjang umur operasionalnya menjadi prioritas utama bagi perusahaan penyedia listrik, termasuk PT PLN (Persero) UPT Cawang. Salah satu aspek yang sangat mempengaruhi kinerja transformator adalah kualitas isolasi. Isolasi yang baik memastikan tidak ada aliran arus bocor yang dapat menyebabkan kerusakan pada komponen internal transformator [5], serta mencegah gangguan pada sistem distribusi listrik secara keseluruhan [6].

Pada dasarnya, kondisi isolasi transformator dapat terdegradasi oleh berbagai faktor seperti usia, suhu operasi, kelembaban, dan kontaminasi [7]. Penurunan kualitas isolasi tidak hanya mengurangi efisiensi transformator tetapi juga meningkatkan risiko kegagalan total yang dapat menyebabkan pemadaman listrik dan kerugian ekonomi yang signifikan [8]. Oleh karena itu, pemantauan dan analisis rutin terhadap kondisi isolasi sangat penting dilakukan [9]. Salah satu metode yang digunakan untuk menilai kondisi isolasi transformator adalah pengukuran tahanan isolasi [10]. Tahanan isolasi yang rendah dapat mengindikasikan adanya kelembaban, kontaminasi, atau degradasi material isolasi yang perlu segera ditangani [11]. Namun, pengukuran tahanan isolasi saja tidak cukup untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi transformator [12]. Dibutuhkan metode yang lebih komprehensif untuk mengevaluasi kesehatan transformator secara keseluruhan [13]. Metode Health Index merupakan pendekatan yang lebih holistik dalam menilai kondisi transformator [14]. Metode ini mengintegrasikan berbagai parameter [15], termasuk hasil pengukuran tahanan isolasi, analisis minyak isolasi, parameter operasional, dan hasil inspeksi fisik [16]. Dengan menggabungkan data dari berbagai sumber, metode Health Index dapat memberikan skor kesehatan yang mencerminkan kondisi aktual transformator [17]. Skor ini kemudian dapat digunakan untuk mengestimasi umur sisa transformator dan merencanakan strategi pemeliharaan yang lebih efektif. PT PLN (Persero) UPT Cawang telah mengadopsi metode ini sebagai bagian dari upaya meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik.

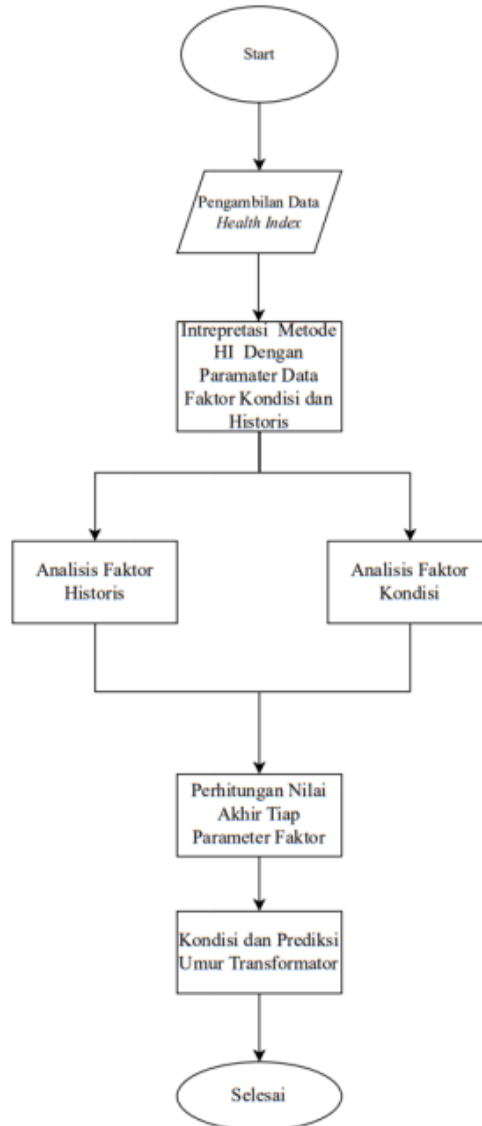
Studi ini bertujuan untuk menganalisis tahanan isolasi dan menggunakan metode Health Index untuk memperkirakan umur transformator di UPT Cawang, serta memberikan rekomendasi tindakan pemeliharaan yang diperlukan [18]. Dengan demikian, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional dan meminimalkan risiko gangguan pada sistem distribusi listrik. Penelitian ini juga berkontribusi dengan menganalisis tahanan isolasi dan estimasi umur transformator melalui metode Health Index, yang sebelumnya jarang diterapkan secara spesifik di PT PLN (Persero) UPT Cawang. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penggunaan data operasional riil untuk mengembangkan model prediktif yang lebih akurat dalam menilai kondisi transformator. Dibandingkan dengan penelitian yang lain, studi ini memberikan pendekatan holistik yang mengintegrasikan berbagai parameter kesehatan transformator, sehingga memungkinkan pemeliharaan yang lebih tepat waktu dan efisien. Hasilnya, dapat meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik dan mengurangi risiko kegagalan transformator di lapangan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Metode Penghitungan Health Index

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis tahanan isolasi dan mengestimasi umur transformator dengan metode Health Index. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari pengujian langsung di lapangan dan analisis laboratorium. Pengujian lapangan meliputi pengukuran tahanan isolasi pada berbagai transformator yang beroperasi di PT PLN (Persero) UPT Cawang. Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan alat uji megger yang dapat memberikan nilai tahanan isolasi dalam satuan Megaohm ($M\Omega$). Selain pengukuran langsung, data juga diperoleh dari analisis minyak isolasi yang mencakup uji Dissolved Gas Analysis (DGA), kadar air, dan Breakdown Voltage (BDV). Hasil-hasil pengujian ini memberikan informasi penting tentang kondisi internal transformator dan potensi degradasi yang terjadi.

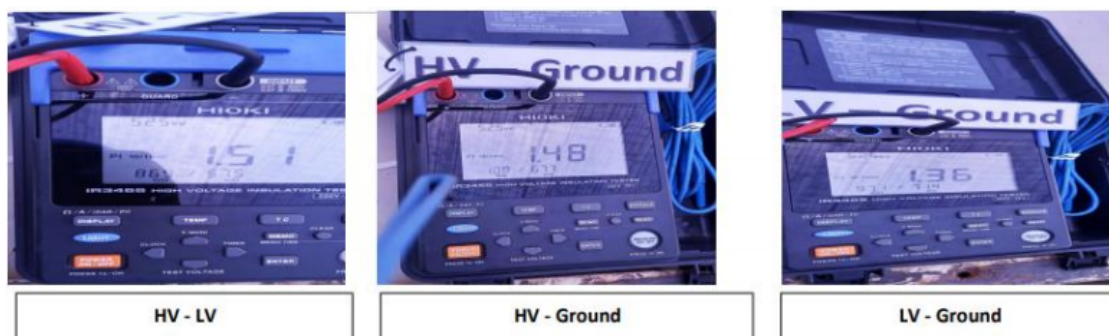
Metode Health Index digunakan untuk mengintegrasikan berbagai parameter hasil pengujian tersebut. Metode ini menggabungkan nilai-nilai dari pengukuran tahanan isolasi, hasil analisis minyak, dan parameter operasional lainnya seperti suhu operasi dan beban transformator seperti terlihat pada Gambar 1. Setiap parameter diberi bobot berdasarkan tingkat kepentingannya terhadap kondisi keseluruhan transformator. Selanjutnya, skor Health Index dihitung dengan menggunakan formula yang telah ditentukan, yang menghasilkan nilai komprehensif yang mencerminkan kondisi kesehatan transformator [19]. Dengan menggunakan nilai Health Index ini, dilakukan estimasi umur sisa transformator. Proses ini melibatkan analisis tren degradasi dan membandingkannya dengan standar industri serta rekomendasi dari pabrikan transformator [20]. Selain itu, dilakukan juga simulasi prediktif untuk memproyeksikan kondisi transformator dalam beberapa tahun mendatang. Data dan hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk laporan yang memberikan rekomendasi tindakan pemeliharaan, seperti perawatan rutin, perbaikan, atau penggantian komponen, guna memastikan keandalan dan efisiensi operasional transformator di PT PLN (Persero) UPT Cawang. Penghitungan Health Index dalam studi ini melibatkan beberapa langkah penting, dimulai dengan pengumpulan data kondisi transformator seperti tahanan isolasi, kadar gas terlarut, dan kondisi fisik. Setiap parameter diberi bobot berdasarkan pentingnya terhadap kesehatan transformator [21]. Selanjutnya, setiap parameter dinormalisasi dan dikonversi menjadi skor indeks menggunakan formula yang ditetapkan. Skor individual ini kemudian dijumlahkan untuk menghasilkan Health Index keseluruhan. Metode ini memungkinkan penilaian komprehensif dari kondisi transformator, membantu dalam estimasi umur dan penentuan tindakan pemeliharaan yang diperlukan [22]. Health Index memberikan gambaran yang jelas tentang seberapa dekat transformator mendekati akhir masa operasionalnya.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Health Index.

2.2 Pengumpulan dan Analisis Data

Pengumpulan data dilakukan secara sistematis dan berkelanjutan untuk memastikan validitas dan akurasi hasil penelitian. Pengukuran tahanan isolasi dilakukan pada transformator yang dipilih secara acak di UPT Cawang untuk mendapatkan representasi yang akurat dari populasi transformator yang ada. Setiap pengukuran dilakukan oleh teknisi yang terlatih menggunakan prosedur standar operasi yang ketat untuk menghindari kesalahan pengukuran seperti terlihat pada Gambar 2. Data yang diperoleh kemudian direkam dan dianalisis secara statistik untuk menentukan nilai rata-rata, deviasi standar, dan tren penurunan kualitas isolasi [23]. Untuk analisis minyak isolasi, sampel minyak diambil dari masing-masing transformator dan diuji di laboratorium independen untuk memastikan objektivitas hasil [24]. Uji DGA, kadar air, dan BDV dilakukan sesuai dengan standar internasional seperti IEEE dan IEC. Hasil uji ini kemudian diinterpretasikan untuk mengidentifikasi adanya gas-gas yang terbentuk akibat degradasi material isolasi dan menentukan kondisi termal serta elektrikal dari transformator.



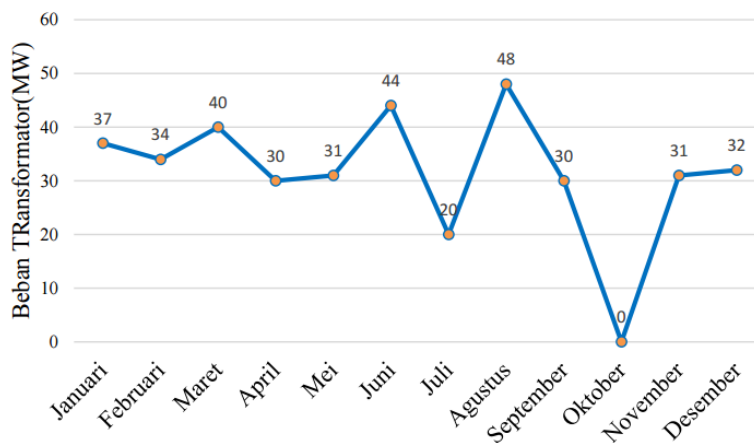
Gambar 2. Pengukuran Polaritas Indeks

Setelah data terkumpul, tahap selanjutnya adalah penghitungan Health Index. Setiap parameter diberi bobot berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap keandalan transformator. Misalnya, hasil DGA mungkin diberi bobot lebih tinggi dibandingkan dengan pengukuran tahanan isolasi karena dapat mengindikasikan adanya kerusakan internal yang lebih serius. Skor individu dari setiap parameter kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan nilai Health Index total. Nilai ini digunakan untuk mengkategorikan kondisi transformator ke dalam beberapa tingkatan kesehatan, seperti baik, cukup, atau buruk [25]. Berdasarkan nilai Health Index, dilakukan estimasi umur sisa transformator dengan menggunakan model degradasi yang telah divalidasi. Model ini mempertimbangkan faktor-faktor seperti kecepatan penurunan kualitas isolasi dan sejarah operasional transformator [26]. Hasil dari estimasi umur ini digunakan untuk merencanakan strategi pemeliharaan yang lebih proaktif dan preventif, sehingga dapat meminimalkan risiko kegagalan transformator dan meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik di PT PLN (Persero) UPT Cawang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Tahanan Isolasi

Hasil pengukuran tahanan isolasi menunjukkan variasi yang signifikan di antara transformator yang diuji di PT PLN (Persero) UPT Cawang. Tahanan isolasi rata-rata tercatat dalam rentang 200 MΩ hingga 1500 MΩ. Transformator yang lebih tua, dengan usia operasi di atas 15 tahun, umumnya menunjukkan nilai tahanan isolasi yang lebih rendah dibandingkan dengan transformator yang lebih baru seperti terlihat pada Gambar 3. Misalnya, transformator A, yang telah beroperasi selama 20 tahun, memiliki tahanan isolasi sebesar 250 MΩ, sementara transformator B, yang beroperasi selama 5 tahun, menunjukkan nilai 1300 MΩ. Nilai tahanan isolasi yang rendah pada transformator tua ini mengindikasikan adanya degradasi material isolasi, kemungkinan akibat paparan panas yang berulang, kelembaban, dan kontaminasi.

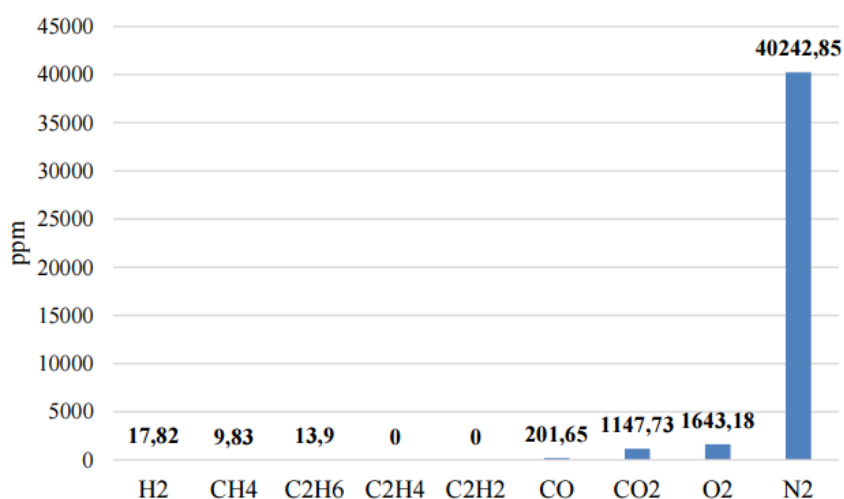


Gambar 3. Grafik periode pembebanan yang digunakan.

Penurunan tahanan isolasi ini memerlukan perhatian khusus karena dapat menyebabkan aliran arus bocor yang berpotensi mengakibatkan kerusakan serius pada transformator. Untuk memastikan validitas hasil, pengukuran dilakukan beberapa kali pada kondisi yang berbeda, termasuk suhu dan kelembaban yang bervariasi [27]. Konsistensi hasil pengukuran menunjukkan bahwa data yang diperoleh dapat diandalkan untuk analisis lebih lanjut [28]. Berdasarkan hasil pengukuran ini, langkah-langkah pemeliharaan seperti pengeringan isolasi dan penggantian minyak transformator direkomendasikan untuk transformator dengan nilai tahanan isolasi di bawah batas aman yang ditetapkan.

3.2 Analisis Minyak Isolasi

Analisis minyak isolasi melalui uji *Dissolved Gas Analysis* (DGA), kadar air, dan Breakdown Voltage (BDV) memberikan wawasan lebih mendalam mengenai kondisi internal transformator. Hasil DGA menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi gas-gas tertentu seperti hidrogen (H_2) dan asetilen (C_2H_2) pada beberapa transformator, yang mengindikasikan adanya aktivitas termal atau elektrik yang tidak normal. Transformator menunjukkan konsentrasi H_2 sebesar 17,82 ppm dan C_2H_2 sebesar 0 ppm, yang melebihi ambang batas yang direkomendasikan oleh standar IEEE seperti terlihat pada Gambar 4. Peningkatan konsentrasi gas ini menunjukkan adanya kemungkinan kerusakan pada komponen internal seperti kabel atau belitan transformator yang memerlukan investigasi lebih lanjut.



Gambar 4. Hasil Pengujian DGA pada transformator.

Selain itu, analisis kadar air dalam minyak isolasi menunjukkan bahwa beberapa transformator memiliki tingkat kelembaban yang tinggi. Transformator memiliki kadar air sebesar 45 ppm, yang dapat menurunkan sifat dielektrik minyak dan meningkatkan risiko kerusakan isolasi. Hasil uji BDV juga menunjukkan bahwa transformator dengan kadar air tinggi cenderung memiliki tegangan tembus yang lebih rendah [29], misalnya, transformator menunjukkan nilai BDV sebesar 20 kV, yang berada di bawah nilai standar minimal 30 kV. Berdasarkan temuan ini, disarankan untuk melakukan pengeringan minyak dan penggantian minyak isolasi untuk transformator yang teridentifikasi memiliki masalah kelembaban [30]. Implementasi prosedur ini diharapkan dapat memperbaiki kinerja dielektrik minyak dan memperpanjang umur operasional transformator.

3.3 Perhitungan Health Index

Penghitungan Health Index dilakukan dengan mengintegrasikan hasil pengukuran tahanan isolasi, analisis minyak isolasi, dan data operasional lainnya. Setiap parameter diberi bobot berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap kondisi keseluruhan transformator. Dimana, hasil DGA diberi bobot 40%, tahanan isolasi 30%, kadar air 20%, dan BDV 10%. Skor untuk

masing-masing parameter kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan nilai Health Index total. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa transformator dengan nilai Health Index di bawah 50% dikategorikan dalam kondisi buruk dan memerlukan tindakan pemeliharaan segera. Transformator dengan nilai Health Index antara 50% hingga 75% dikategorikan dalam kondisi cukup dan memerlukan pemantauan rutin serta tindakan pemeliharaan preventif. Sementara itu, transformator dengan nilai di atas 75% dianggap dalam kondisi baik dan hanya memerlukan pemeliharaan rutin. Sementara, transformator dengan nilai Health Index sebesar 80% menunjukkan bahwa transformator ini dalam kondisi yang baik dan siap untuk operasi jangka panjang dengan risiko kegagalan yang rendah [31]. Hasil ini memberikan panduan yang jelas bagi tim pemeliharaan di PT PLN (Persero) UPT Cawang untuk mengatur prioritas pemeliharaan dan alokasi sumber daya dengan lebih efektif.

3.4 Estimasi Umur Transformator

Berdasarkan nilai Health Index yang diperoleh, dilakukan estimasi umur sisa transformator menggunakan model degradasi yang mempertimbangkan tren penurunan kualitas isolasi dan kondisi operasional. Transformator yang memiliki nilai Health Index rendah diperkirakan memiliki umur sisa yang lebih pendek. Transformator dengan nilai Health Index 45% diperkirakan hanya memiliki sisa umur 5 tahun, mengingat laju degradasi material isolasi yang cepat. Sebaliknya, transformator dengan nilai Health Index 80% diperkirakan memiliki sisa umur lebih dari 15 tahun, menunjukkan bahwa kondisi operasional dan pemeliharaan yang baik telah memperlambat laju degradasi. Estimasi umur sisa ini penting untuk merencanakan strategi pemeliharaan yang lebih proaktif. Dengan mengetahui umur sisa transformator, tim pemeliharaan dapat merencanakan penggantian atau perbaikan sebelum terjadi kegagalan yang tidak diinginkan [32]. Selain itu, hasil penelitian ini juga mengindikasikan bahwa metode Health Index efektif dalam memberikan gambaran komprehensif tentang kondisi transformator dan membantu dalam pengambilan keputusan terkait pemeliharaan [33]. Implementasi metode ini di PT PLN (Persero) UPT Cawang telah membuktikan bahwa dengan pemantauan yang tepat dan tindakan preventif yang diambil berdasarkan hasil Health Index, keandalan sistem distribusi listrik dapat ditingkatkan secara signifikan.

Secara keseluruhan, hasil dari studi ini adalah bahwa analisis tahanan isolasi yang dikombinasikan dengan metode Health Index memberikan alat yang sangat efektif untuk mengestimasi umur dan kondisi transformator. Rekomendasi pemeliharaan yang dihasilkan dari studi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi risiko gangguan pada sistem distribusi listrik di PT PLN (Persero) UPT Cawang. Selain itu, pengembangan lebih lanjut terhadap metode ini dengan integrasi teknologi monitoring online dapat memberikan data kondisi transformator secara real-time dan lebih akurat, sehingga strategi pemeliharaan dapat lebih responsif terhadap perubahan kondisi operasional.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Secara ringkas, menunjukkan bahwa analisis tahanan isolasi yang dikombinasikan dengan metode Health Index adalah pendekatan yang efektif untuk menilai kondisi dan memperkirakan umur transformator di PT PLN (Persero) UPT Cawang. Pengukuran tahanan isolasi memberikan indikasi awal tentang kondisi material isolasi, sementara analisis minyak isolasi melalui uji Dissolved Gas Analysis (DGA), kadar air, dan Breakdown Voltage (BDV) memberikan wawasan lebih mendalam mengenai kondisi internal transformator. Metode Health Index memungkinkan integrasi berbagai parameter ini menjadi satu nilai komprehensif yang mencerminkan kondisi keseluruhan transformator. Hasil perhitungan Health Index membantu dalam mengidentifikasi transformator yang memerlukan tindakan pemeliharaan segera, serta memberikan estimasi umur sisa yang akurat. Dengan demikian, metode ini tidak hanya membantu dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional, tetapi juga mengurangi risiko kegagalan yang dapat menyebabkan gangguan pada sistem distribusi listrik.

Berdasarkan temuan penelitian ini, disarankan agar PT PLN (Persero) UPT Cawang terus

menerapkan metode Health Index secara rutin untuk pemantauan kondisi transformator. Implementasi pemantauan berbasis teknologi monitoring online juga dianjurkan untuk mendapatkan data kondisi transformator secara real-time, yang memungkinkan deteksi dini terhadap potensi masalah dan pengambilan tindakan preventif yang lebih cepat. Selain itu, pelatihan dan peningkatan kompetensi teknisi dalam melakukan pengukuran dan analisis hasil sangat penting untuk memastikan akurasi dan keandalan data. Disarankan juga untuk melakukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh faktor lingkungan dan operasional terhadap degradasi material isolasi, sehingga dapat dikembangkan model prediktif yang lebih tepat. Dengan mengintegrasikan teknologi terbaru dan meningkatkan kemampuan analisis, diharapkan keandalan transformator dan sistem distribusi listrik di PT PLN (Persero) UPT Cawang dapat terus ditingkatkan, memberikan layanan listrik yang lebih stabil dan efisien kepada konsumen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Pertamina dan PT PLN (Persero) UPT Cawang atas dukungan dan kesempatan yang diberikan untuk melakukan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh tim teknisi dan staf laboratorium yang telah membantu dalam pengumpulan dan analisis data.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. D. Medina, D. A. Zaldivar, A. A. Romero, J. Zuñiga, and E. E. Mombello, "A fuzzy inference-based approach for estimating power transformers risk index," *Electric Power Systems Research*, vol. 209, p. 108004, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108004.
- [2] L. R. Chandran, G. S. Ajith Babu, M. G. Nair, and K. Ilango, "A review on status monitoring techniques of transformer and a case study on loss of life calculation of distribution transformers," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 4659–4666, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.290.
- [3] G. S. Elbasuony, S. H. E. Abdel Aleem, A. M. Ibrahim, and A. M. Sharaf, "A unified index for power quality evaluation in distributed generation systems," *Energy*, vol. 149, pp. 607–622, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.088.
- [4] S. Ghufron and S. Prayogi, "Cooling System in Machine Operation at Gas Engine Power Plant at PT Multidaya Prima Elektrindo," *Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)*, vol. 1, no. 2, Art. no. 2, 2023, doi: 10.31004/riggs.v1i2.21.
- [5] F. Silviana and S. Prayogi, "Pemanfaatan Bahan Bekas sebagai Alat Peraga IPA Ramah Lingkungan," *Berdikari: Jurnal Inovasi dan Penerapan Ipteks*, vol. 11, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2023, doi: 10.18196/berdikari.v11i2.17845.
- [6] P. Bohatyrewicz and S. Banaszak, "Assessment Criteria of Changes in Health Index Values over Time—A Transformer Population Study," *Energies*, vol. 15, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15166078.
- [7] W. Zuo, H. Yuan, Y. Shang, Y. Liu, and T. Chen, "Calculation of a Health Index of Oil-Paper Transformers Insulation with Binary Logistic Regression," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1155/2016/6069784.
- [8] J. Wang, K. Wu, W. Zhu, and C. Gu, "Condition Assessment for Power Transformer Using Health Index," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 199, p. 012046, May 2017, doi: 10.1088/1757-899X/199/1/012046.
- [9] R. M. Arias Velásquez, J. V. Mejía Lara, and A. Melgar, "Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers," *Engineering Failure Analysis*, vol. 101, pp. 215–229, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.03.027.
- [10] E. Hwang *et al.*, "Development of a Bispectral index score prediction model based on an interpretable deep learning algorithm," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 143, p. 102569, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.artmed.2023.102569.
- [11] R. Soni and B. Mehta, "Diagnosis and prognosis of incipient faults and insulation status for asset management of power transformer using fuzzy logic controller & fuzzy clustering

- means,” *Electric Power Systems Research*, vol. 220, p. 109256, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109256.
- [12] D. G. T. Da Silva, H. J. Braga Da Silva, F. P. Marafão, H. K. M. Paredes, and F. A. S. Gonçalves, “Enhanced health index for power transformers diagnosis,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 126, p. 105427, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105427.
- [13] H. Zeinoddini-Meymand and B. Vahidi, “Health index calculation for power transformers using technical and economical parameters,” *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 10, no. 7, pp. 823–830, 2016, doi: 10.1049/iet-smt.2016.0184.
- [14] H. Guo and L. Guo, “Health index for power transformer condition assessment based on operation history and test data,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 9038–9045, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.041.
- [15] S. Prayogi, F. Silviana, and Z. Zainuddin, “Scientific Explanation of the Photoelectric Effect Using Common Objects,” *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, vol. 19, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2023, doi: 10.15294/jpfi.v19i2.40332.
- [16] W. R. Tamma, R. A. Prasajo, and Suwarno, “High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate,” *High Voltage*, vol. 6, no. 2, pp. 314–327, 2021, doi: 10.1049/hve2.12074.
- [17] J. Y. Ten and M. H. Hassim, “Improving the sensitivity of safety and health index assessment in optimal molecular design framework,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 124, pp. 238–252, May 2019, doi: 10.1016/j.compchemeng.2018.12.012.
- [18] F. Silviana and S. Prayogi, “Utilization of Smartphones in Experiments of Measurement of Electron-Mass Charge Ratio,” *International Journal of Engineering and Science Applications*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, May 2023.
- [19] S. Milosavljevic and A. Janjic, “Integrated Transformer Health Estimation Methodology Based on Markov Chains and Evidential Reasoning,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, p. e7291749, May 2020, doi: 10.1155/2020/7291749.
- [20] S. Prayogi and F. Silviana, “LED lights of various colors for comprehending the photoelectric effects phenomena,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 22, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2024, doi: 10.24843/MITE.2023.v22i02.P12.
- [21] Y. Wei, D. Wu, and J. Terpenney, “Learning the health index of complex systems using dynamic conditional variational autoencoders,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 216, p. 108004, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.res.2021.108004.
- [22] Y. Liu, X. Hu, and W. Zhang, “Remaining useful life prediction based on health index similarity,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 185, pp. 502–510, May 2019, doi: 10.1016/j.res.2019.02.002.
- [23] S. Prayogi, “Enhancement of the Silicon Nanocrystals’ Electronic Structure within a Silicon Carbide Matrix,” *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 24, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2024, doi: 10.22146/ijc.79864.
- [24] H. Torkaman and F. Karimi, “Measurement variations of insulation resistance/polarization index during utilizing time in HV electrical machines – A survey,” *Measurement*, vol. 59, pp. 21–29, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2014.09.034.
- [25] A. Abdullah, R. Ali, S. Yaacob, T. Mansur, and N. Baharudin, “Prediction of Transformer Health Index Using Condition Situation Monitoring (CSM) Diagnostic Techniques,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1878, no. 1, p. 012007, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1878/1/012007.
- [26] M. Marzuki, S. Prayogi, and M. Abdillah, “Data-Driven Based Model For Predictive Maintenance Applications In Industrial System,” presented at the Proceedings of the International Conference on Sustainable Engineering, Infrastructure and Development, ICO-SEID 2022, 23-24 November 2022, Jakarta, Indonesia, Dec. 2023. Accessed: Jun. 04, 2024. [Online]. Available: <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.23-11-2022.2341596>
- [27] S. Prayogi, “Solar Cells Characterization Polycrystalline with Sun Simulator System Using Light Halogen Bulb,” presented at the Proceedings of the International Conference on Sustainable Engineering, Infrastructure and Development, ICO-SEID 2022, 23-24

- November 2022, Jakarta, Indonesia, Dec. 2023. Accessed: Jun. 04, 2024. [Online]. Available: <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.23-11-2022.2338872>
- [28] S. Li, X. Li, Y. Cui, and H. Li, "Review of Transformer Health Index from the Perspective of Survivability and Condition Assessment," *Electronics*, vol. 12, no. 11, Art. no. 11, Jan. 2023, doi: 10.3390/electronics12112407.
- [29] A. P. M. Erlangga, K. S. K. Dinatha, F. E. Nainggolan, and S. Prayogi, "Prototipe Otomatisasi dan Pemantauan Sistem Hidroponik Berbasis IoT dengan Pemanfaatan Solar Panel Sebagai Sumber Energi," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 7, no. 4, pp. 1367–1377, Oct. 2023, doi: 10.33379/gtech.v7i4.3143.
- [30] R. de Carvalho Paes Loureiro, M. Beres, M. Masoumi, and H. Ferreira Gomes de Abreu, "The effect of pearlite morphology and crystallographic texture on environmentally assisted cracking failure," *Engineering Failure Analysis*, vol. 126, p. 105450, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105450.
- [31] S. Ahmadi, M. Yeganeh, M. B. Motie, and A. Gilandoust, "The role of neighborhood morphology in enhancing thermal comfort and resident's satisfaction," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 9046–9056, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.07.042.
- [32] P. Wang, W. Qiao, Y. Wang, S. Cao, and Y. Zhang, "Urban drought vulnerability assessment – A framework to integrate socio-economic, physical, and policy index in a vulnerability contribution analysis," *Sustainable Cities and Society*, vol. 54, p. 102004, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.102004.
- [33] E. J. Kadim, N. Azis, J. Jasni, S. A. Ahmad, and M. A. Talib, "Transformers Health Index Assessment Based on Neural-Fuzzy Network," *Energies*, vol. 11, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/en11040710.