

Metode Smart Monitoring Transformator: Studi Literature

Muhammad Isnain Wiyasatama^{1*}; Firdaus¹; Hendra Setiawan¹

1. Universitas Islam Indonesia, Magister Rekayasa Elektro
Jl. Kaliurang Km.14.5, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584, Indonesia

*Email: 23925003@students.uii.ac.id

Received: 09 January 2024 | Accepted: 31 Mei 2024 | Published: 05 Juli 2024

ABSTRACT

Power transformer play a crucial role in the electrical power system, ensuring efficient energy distribution from substations to consumers. However, transformer failures, especially in distribution, are often caused by excessive loads, inadequate monitoring, and environmental factors. To address these challenges, various methods for monitoring and evaluating transformer health have been studied, including techniques such as IoT monitoring, fuzzy logic, machine learning, and hybrid artificial intelligence approaches. This paper presents an in-depth analysis of these methods, comparing their strengths and weaknesses in monitoring distribution transformer. Through a literature review, emphasis is placed on the importance of cutting-edge technologies, such as IoT, cloud computing, and AI, in enhancing real-time monitoring, highlighting the need for reliable yet cost-effective monitoring solutions. Focusing on future technologies, this paper summarizes the need for affordable and advanced monitoring solutions to maintain transformer health in the electrical power distribution network.

Keywords: transformer, substation, transformer health, transformer maintenance, transformer monitoring

ABSTRAK

Transformator daya adalah komponen vital dalam sistem tenaga listrik, memastikan distribusi energi yang efisien dari gardu induk ke konsumen. Namun, kegagalan transformator, terutama dalam distribusi seringkali disebabkan oleh beban berlebih, kurangnya pemantauan dan faktor-faktor lingkungan. Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai metode pemantauan dan evaluasi kesehatan transformator telah dikaji, termasuk teknik seperti pemantauan IoT, logika fuzzy, machine learning, dan pendekatan kecerdasan buatan hybrid. Tulisan ini menyajikan analisis mendalam tentang metode-metode ini, membandingkan kelebihan dan kekurangannya dalam pemantauan transformator distribusi. Melalui literatur review, penekanan diberikan pada pentingnya teknologi terkini, seperti IoT, cloud, dan AI, dalam meningkatkan pemantauan real-time, menekankan perlunya solusi pemantauan yang handal namun berbiaya rendah. Dengan fokus pada teknologi masa depan, tulisan ini merangkum kebutuhan akan solusi pemantauan yang terjangkau dan canggih untuk menjaga kesehatan transformator dalam jaringan distribusi tenaga listrik.

Kata kunci: transformator, gardu induk, kesehatan transformator, pemeliharaan transformator, pemantauan transformator

1. PENDAHULUAN

Transformator daya merupakan komponen kunci dalam infrastruktur sistem tenaga listrik modern. Sebagai inti dari jaringan distribusi dan transmisi listrik, transformator memainkan peranan penting dalam mengubah level tegangan listrik untuk memenuhi kebutuhan berbagai pengguna akhir [1]. Dari rumah tangga hingga industri berat, transformator daya menjamin bahwa energi listrik dapat disalurkan secara efisien dan aman melintasi jarak yang jauh. Sebagai tulang punggung jaringan listrik, keandalan dan efisiensi transformator daya adalah kunci utama untuk memastikan distribusi energi yang stabil dan berkelanjutan [2].

Desain transformator daya menghadapi berbagai tantangan, mulai dari kebutuhan adaptasi terhadap teknologi yang terus berkembang, sehingga permintaan untuk efisiensi tinggi dan ketahanan terhadap kerusakan dan kegagalan. Dengan semakin kompleksnya jaringan listrik dan berkembangnya sumber energi terbarukan, transformator daya kini harus dirancang dengan lebih canggih. Hal ini mencakup kebutuhan untuk mengintegrasikan teknologi baru, memenuhi standar keamanan yang lebih ketat, dan adaptasi dengan berbagai kondisi operasional. Selain itu, peningkatan kebutuhan akan transformator yang lebih ramah lingkungan dan hemat biaya juga menambahkan kompleksitas dalam proses desainnya [3].

Pada [4] gardu induk *High Voltage / Medium Voltage* menjadi pusat dari distribusi tenaga listrik ke konsumen meliwati jaringan transformator distribusi yang dapat digunakan oleh konsumen baik skala industri maupun rumah tangga. Didalam sebuah kota dimungkinkan terdapat 1 gardu induk dengan lebih dari 40 transformator distribusi, banyak diantara peralatan transformator distribusi yang mengalami kegagalan atau kerusakan peralatan dengan berbagai kondisi [5]. Percepatan penurunan dan kegagalan transformator distribusi ini dapat terjadi dikarenakan beberapa kondisi seperti kebocoran minyak transformator, kelebihan beban, pembebanan yang tidak seimbang, dan harmonisasi. Namun dalam beberapa studi kasus kerusakan sebgaiain besar disebabkan oleh kombinasi dari tekanan mekanik, listrik dan *thermal* yang terjadi pada komponen transformator daya dari waktu ke waktu [4]. Dalam desain transformator pabrik sudah menetapkan batas desain dan operasional, dampaknya yang terjadi terhadap masa pakai bersifat non-biner dan multi dimensi, misalkan melebihi batasan *thermal* sampai nilai toleransi yang diberikan untuk waktu yang singkat tidak memberikan efek secara langsung, tetapi kelebihan beban yang lebih parah dalam waktu yang lama kemungkinan besar akan mengakibatkan kerusakan permanen.

Artificila inteligent (AI), *machine learning* (ML), *internet of thing* (IoT) dan kemajuan teknologi lainnya yang berhubungan dengan *smart gird*, *smart system*, *internet* telah muncul sebagai teknologi revolusioner yang berpotensi mengubah banyak aspek industri, termasuk sektor ketenagalistrikan [5]. Dalam [6] konteks transformator daya, kemajuan teknologi menawarkan kemungkinan untuk mengoptimalkan desain, meningkatkan efisiensi operasional, dan memprediksi serta mencegah kegagalan peralatan. Dengan kemampuan untuk memproses data dalam jumlah besar dan menghasilkan wawasan yang berharga yang dapat membantu dalam membuat keputusan desain yang lebih tepat dan efektif. Dari analisa data operasional hingga pengembangan model prediksi kerusakan kemajuan teknologi membuka jalan baru untuk inovasi dalam desain transformator daya.

Banyak jurnal yang telah mempelajari dan mengembangkan metode yang efektif untuk melakukan pemantauan kondisi dan kesehatan berbagai tipe transformator. Dalam *literature review* ini, mengenalkan tentang metode pemantauan yang berbeda untuk transformator distribusi maupun daya, menguraikan dengan skema yang berbeda berdasarkan metode penelitian yang berbeda. Adapun pembahasan kontribusi dari tinjauan ini adalah dijelaskan sebagai berikut ini;

- Meninjau dari metode khusus yang digunakan untuk memantau transformator distribusi modern, dengan menampilkan metodologi yang disajikan, dievaluasi, dan didiskusikan. Mengetengahkan keunggulan dan kekurangan dari penggunaan masing-masing metode yang disajikan.
- Review ini memunculkan berbagai pemikiran mengenai parameter yang sesuai guna proses *monitoring online / real-time* yang berbeda untuk evaluasi kondisi transformator.
- Menampilkan sejumlah kegagalan atau kerusakan yang muncul.

Literature review ini menyajikan nilai praktis guna memunculkan referensi yang baik dan dapat dikembangkan lebih baru untuk membantu operator dalam hal ini pada area pembangkitan, gardu induk penyulang, maupun gardu induk distribusi, serta transformator distribusi konsumen. Menetapkan strategi pemeliharaan dan durasi waktu penggantian transformator sebelum terjadi kegagalan

2. METODE

Pada tinjauan ini akan disusun dalam beberapa bagian, mencakup mode kegagalan transformator distribusi dan menyelidiki komponen utama yang paling penting bagi kesehatan transformator, menampilkan perkembangan teknik penilaian kesehatan, bagian ini merangkum kelebihan dan kekurangan metode perhitungan indeks kesehatan dasar, *fuzzy logic*, *machine learning algorithms*, dan pendekatan *hybrid artificial intelligence*. Serta menyajikan teknologi terkini untuk menampilkan penilaian kesehatan transformator secara *real-time* pada jaringan cerdas (*smart distribution grid*) dan kesimpulan dibagian akhir.

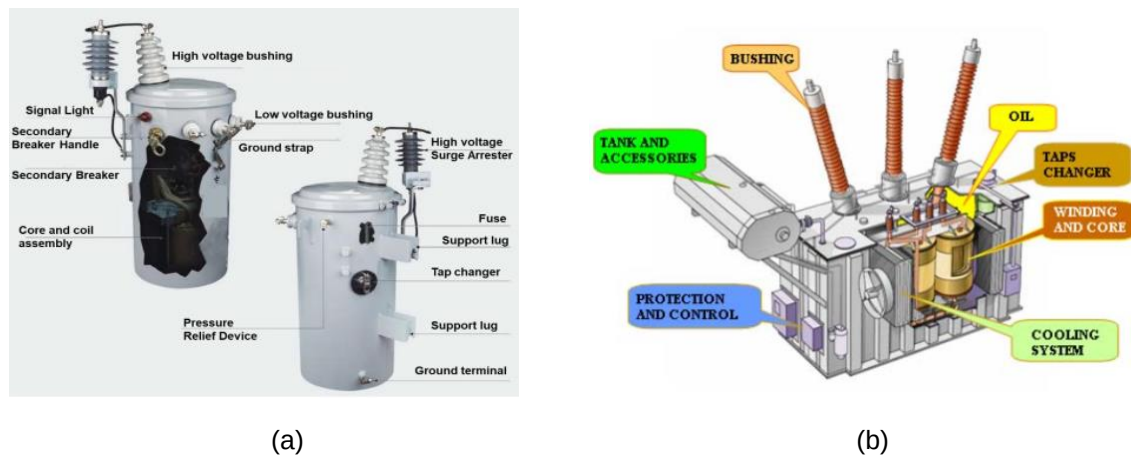
2.1. Jenis Kerusakan Transformator Distribusi

Statistik dari PT Perusahaan Listrik Negara (PT PLN) tahun 2022 [7], total panjang jaringan transmisi mencapai 68.205,81 km, yang terdiri atas jaringan 500 kV sepanjang 6.970,92 km, jaringan 275 kV sepanjang 3.828,11 km, jaringan 150 kV sepanjang 51.395,60 km, jaringan 70 kV sepanjang 5.910,21 km dan jaringan 25 & 30 kV sepanjang 100.95 km. Total panjang jaringan distribusi sepanjang 1.033.662,09 km, terdiri dari jaringan tegangan menengah (JTM) sepanjang 430.509,15 km dan jaringan tegangan rendah (JTR) sepanjang 603.152,92 km.

Kapasitas terpasang transformator gardu induk sebesar 161.367 MVA. Jumlah gardu induk sebanyak 2.326 unit, terdiri dari transformator 500 kV sebanyak 84 unit, sistem 275 kV sebanyak 42 unit, sistem 150 kV sebanyak 1.931 unit, sistem 70 kV sebanyak 267 unit, dan sistem kurang dari 30 kV sebanyak 2 unit. Kapasitas terpasang dan jumlah transformator gardu distribusi menjadi 65.439 MVA dan 550.852 unit [31].

Identifikasi invertigasi dan analisa pengujian telah dilakukan untuk mengidentifikasi akar penyebab serta langkah-langkah pencegahan guna menghindari kerusakan transformator daya. Pada jurnal [6] diindikasikan bagian paling kritis terhadap kesehatan transformator dengan tingkat kegagalan yang tinggi ditunjukkan pada bagian isolasi

sebesar 41% insiden kegagalan, pada belitan sebesar 14%, bushing 10%, dan perubahan beban 10%. Komponen lain dalam sistem pendingin, inti dan kesalahan operasional tidak mempunyai efek yang signifikan. Transformator [8] distribusi secara umum terdiri dari dua jenis: tranformer yang terpasang pada tiang dan transformator gardu induk. Pada kedua kasus tersebut pada EN 60076, fitur konstruksi yang berbeda dapat diidentifikasi. Secara khusus insulasi dapat berupa insulasi kering atau minyak, struktur dasar untuk transformator distribusi ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Bagan Transformator Distribusi (a) dan Gardu Induk (b)

Berdasarkan parameter yang digunakan secara garis besar dapat di kategorikan kegagalan komponen transformator dan tingkat dampak operasi seperti tabel 1, yang terjadi pada transformator distribusi dengan tipe *overhead* pada tegangan 20kV [2, 3, 6, 8].

Tabel 1. Jenis Kegagalan Komponen Transformator

No	Komponen	Kategori Kegagalan	Mode Kegagalan	Frekuensi Kejadian	Dampak Operasi
1	Isolasi	Kimia / Mekanis Kimia / Panas <i>Thermal</i>	Air dalam minyak Penurunan isolasi/minyak Penurunan <i>thermal</i> minyak/kertas	Tinggi	Tinggi
2	Bushing	Listrik / Mekanik Mekanis / <i>Thermal</i>	Arus pendek/short circuit <i>Thermal</i> mekanis	Sedang	Tinggi
3	Tangki	Porselen Mekanis / <i>Thermal</i>	Bocor/pecah Korosi	Sedang	Tinggi
4	Inti	Listrik / Mekanik Mekanis / <i>Thermal</i>	Hubung singkat belitan Deformasi inti	Rendah	Rendah
5	lainnya	Penyebab lain	Kesalahan operasional, kurang pemeliharaan, trip gangguan	Rendah	Rendah

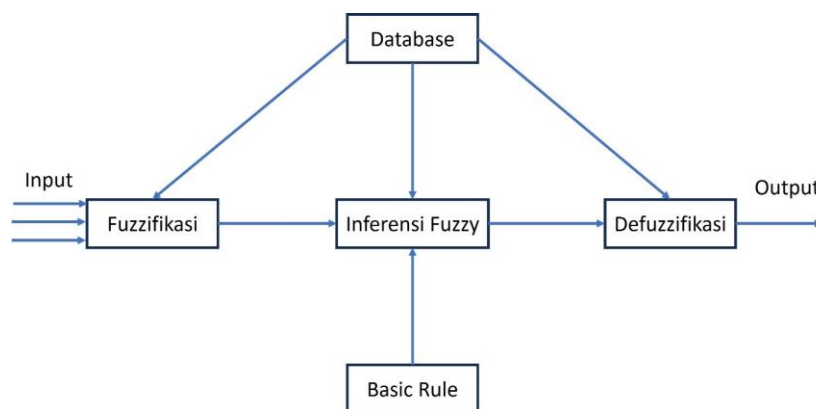
2.2. Penilaian Kesehatan Transformator

Metode menentukan indeks kesehatan transformator merupakan alat bantu praktis dalam melakukan pengamatan dan penggabungan hasil beberapa pengamatan operasi, inspeksi lapangan, dan hasil pengujian lapangan serta laboratorium ke dalam indeks obyektif yang digunakan sebagai alat ukur kesehatan secara keseluruhan [9]. Metode ini sangat penting untuk tinjauan manajemen asset karena membantu deteksi dini, memprioritaskan, dan menjadwalkan investasi yang diperlukan kedalam pemodelan program dan pemeliharaan [10]. Tujuan [11, 12, 13] dari proses pemantauan kesehatan transformator ini adalah untuk:

- Menentukan teknik pengukuran yang tepat yang dapat digunakan untuk pemantauan kesehatan transformator yang berbiaya rendah, akurat dan *real-time*.
- Membuat metode untuk menentukan kesehatan transformator dari nilai pengukuran serta data operasi, data lapangan dan data lingkungan yang sesuai.
- Untuk meningkatkan validasi lapangan, algoritma atau implementasi sistem cerdas secara lokal dan atau terpusat dengan server memanfaatkan *internet of thing* (IoT) untuk mengukur dan menganalisa karakteristik operasional transformator dan dapat memberikan indeks kesehatan secara keseluruhan yang mencakup mode kegagalan dan degradasi yang terkait.

2.3. Penggunaan Fuzzy Logic

Fuzzy logic diusulkan sebagai pendekatan untuk monitoring kesehatan transformator yang sesuai, digunakan untuk merepresentasikan konsep yang tidak jelas dan minim informasi yang tidak pasti, terutama dalam kasus-kasus dimana penerapan teknik logika konvensional tidak dapat diterapkan secara pasti [16]. Struktur penggunaan control fuzzy secara lengkap meliputi 3 langkah: *fuzzification*, *inference* dan *defuzzification*. Pada langkah fuzzification menghitung nilai eksak pada input. Inference fuzzy menerapkan semua aturan fuzzy yang berlaku untuk menghitung nilai fuzzy untuk output. Defuzzification digunakan untuk menentukan nilai output yang tepat dari hasil fuzzy yang diperoleh pada langkah inference fuzzy. Struktur dasar dari sistem kontrol fuzzy ditunjukkan pada gambar 2.

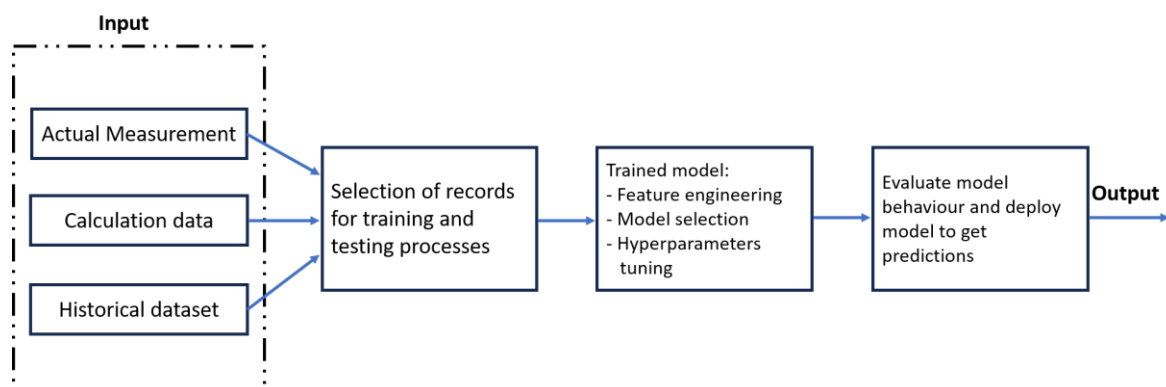


Gambar 2. Bagan Kontrol Fuzzy

2.4. Penggunaan *Machine Learning*

Machine learning (ML) [18] merupakan algoritma yang meningkatkan secara otomatis melalui suatu pengalaman, didapat dari kondisi lapangan ataupun operasi sebagai database. Dari parameter-parameter yang didapat dibuat suatu aturan hubungan dan persamaan untuk meningkatkan akurasi dan keandalan ML perlu ditentukan dari banyak parameter yang memungkinkan dan tidak saling berhubungan satu sama lainnya dan sulit dihitung. Dalam ML membutuhkan basis data untuk mempelajari korelasi yang diinginkan dan membuat prediksi atau keputusan tanpa diprogram secara eksplisit untuk mengimplementasikan tugas semisal memprediksi kondisi suatu transformator. Tujuan dengan penggunaan ML ini algoritma kecerdasan buatan dimungkinkan memiliki potensi untuk diterapkan pada sistem yang murah yang membantu menjaga biaya dan kompleksitas sistem secara keseluruhan tetap berbiaya rendah. Struktur model dasar *machine learning* dapat diilustrasikan pada gambar 3. Algoritma ML yang sering digunakan dalam diagnosa transformator adalah:

- *Artificial Neural Network (ANN)*
- *Random Forest (RF)*
- *Support Vector Machine (SVM)*



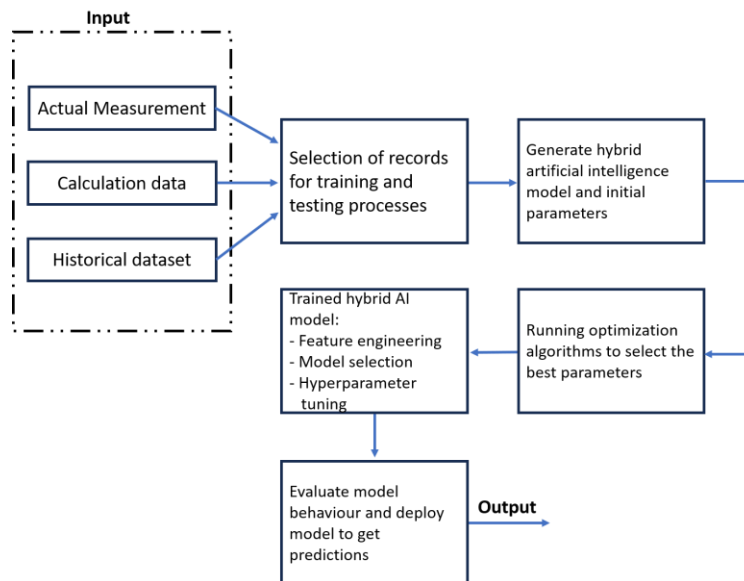
Gambar 3. Model Dasar *Machine Learning*

Dalam penggunaan ML pada ANN pada beberapa artikel yang diterbitkan ANN memberikan hasil yang dapat diandalkan tetapi metode ini membutuhkan banyak masukan database terutama untuk arsitektur dengan banyak lapis. Pada algoritma RF digunakan untuk diagnosa kesalahan yang diterapkan pada transformator karena kemampuan generalisasi model yang kuat, RF dapat menghasilkan materi kedekatan dan akurasi tinggi serta hasil yang lebih stabil. Adapun SVM merupakan model pembelajaran yang diawasi dengan algoritma pembelajaran yang terkait. Model SVM sangat cocok untuk masalah nonliner dengan jumlah sampel yang kecil.

Dalam penggunaan ML masih mempunyai potensi yang sangat besar dalam aplikasi praktis dan banyak keuntungan yang luar biasa. Masalah yang masih ditemui adalah bagaimana jika ditemukan database baru untuk menghindari masalah *overfitting* atau bagaimana cara meningkatkan akurasi algoritma pembelajaran.

2.5. Penggunaan *Hybrid Artificial Intelligence Approaches*

Genetic Algorithm (GA) merupakan alat komputasi dalam mencari hasil yang optimal dan mendukung mendukung fungsi multi objektif, algoritma ini merupakan yang paling canggih dari teknik kecerdasan buatan dan banyak digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi [16]. *Smart system* [10] digunakan untuk mengawasi transformator seperti contoh pada transformator distribusi secara online, sistem ini mengintegrasikan perangkat elektronik canggih untuk mengumpulkan data dari sensor yang dipasang pada transformator. Dengan adanya jaringan komunikasi, hasil penilaian kesehatan dapat dipantau secara *real-time* ditransfer kepada operator. Struktur umum dari model kecerdasan ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Model Dasar *Hybrid Artificial Intelligence*

Particle swarm optimization (PSO) merupakan algoritma optimasi yang diterapkan dalam koordinasi dengan jaringan saraf tiruan.

Perbandingan antara metodologi penelitian kesehatan transformator berdasarkan parameter pemantauan, jumlah sampel, akurasi, kompleksitas, biaya implementasi dan upaya komputasi dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Metodologi Penilaian Kesehatan Transformator

Metode	Datase t	Parameter	Samp el	Akurasi	Kompleksita s	Biaya	Peran Komputasi
Indeks kesehata n		✓	Sedikit	Renda h	Rendah	Tinggi	Tinggi
Fuzzy Logic		✓	Sedikit	Renda h	Rendah	Tinggi	Rendah

Artificial neural networks	✓		Banyak	Bagus	Rendah	Rendah	Rendah
Machine Learning (RF)	✓		Banyak	Bagus	Rendah	Rendah	Rendah
GA		✓	Sedikit	Bagus	Tinggi	Tinggi	Tinggi
GA & SVM	✓		Sedikit	Tinggi	Tinggi	Rendah	Tinggi
PSO & SVM	✓		Sedikit	Tinggi	Tinggi	Rendah	Tinggi

Tabel 3 merangkum analisis di atas yang menyoroti keuntungan dan kerugian dari pendekatan-pendekatan yang ada didalam literatur.

Tabel 3. Perbandingan Keuntungan dan Kerugian

Metode	Keuntungan		Kekurangan	
Indeks kesehatan [3, 6, 10, 16, 17]	-	Dapat dihandalkan	-	Akurasi tergantung parameter
	-	Dapat bekerja sampel kecil	-	Pemantauan kondisi perlu keahlian manusia
Fuzzy Logic [1]	-	Mudah aplikasi	-	Membutuhkan unit kontrol elektronik yang canggih
	-	Mudah pemodelan	-	Perlu validasi pemodelan <i>fuzzy</i> dengan <i>hardware</i>
	-	Murah		
Artificial neural networks [10, 16, 17, 18]	-	Database sedikit	-	Perlu data besar / banyak
	-	Akurasi tinggi	-	Hasil tergantung data
			-	Tidak dapat diterapkan pada sampel kecil
Machine Learning (RF) [1, 16, 17, 18]	-	Komputasi sedikit	-	Tidak dapat diterapkan pada sampel kecil
	-	Penggunaan sensor lebih murah	-	Akurasi tergantung masukan parameter yang dipilih
	-	Akurasi data tinggi		
GA [1, 6, 10, 16]	-	Dapat diandalkan	-	Variabel terbatas
	-	Dukungan multi objek	-	Pemrosesan perlu waktu lama
	-	Database tinggi		
GA & SVM [17]	-	Performa baik dengan sampel sedikit	-	Kurang cocok untuk <i>big data</i>
	-	Akurasi diagnostik tinggi	-	Parameter SVM sulit
			-	Over fitting bisa terjadi
PSO & SVM [17]	-	Database sedikit, nonlinier	-	Perlu parameter spesifik
	-	Membutuhkan parameter sedikit	-	Tidak dapat bekerja dengan variabel banyak

Perlu dibuatkan pertimbangan ketergantungan metode yang dipelajari dan digunakan pada kondisi beban, suhu, efek penuaan transformator dari waktu ke waktu. Mendiskripsikan akar penyebabnya adalah kegagalan pada transformator distribusi disebabkan oleh kelebihan beban dan pembebanan yang kurang seimbang. Pola pembebanan transformator berpengaruh langsung pada arus pada belitan dan karenanya akan berpengaruh meningkatkan suhu pada belitan dan minyak transformator yang dapat mempercepat penuaan transformator, sehingga mengurangi masa pakai transformator. Pendekatan kecerdasan buatan sering diterapkan berdasarkan parameter pengukuran aktual untuk meningkatkan akurasi. Penelitian lebih lanjut akan diselidiki dimasa depan untuk mengevaluasi pentingnya indikator pada transformator, sehingga meningkatkan akurasi dan keandalan model penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem pemantauan online belum secara langsung diimplementasikan pada transformator dimasa lampau. Dengan generasi baru jaringan distribusi pintar, *internet of thing*, *cloud* dan infrastruktur pengukuran canggih sering kali digabungkan dalam sistem tenaga listrik. Sistem kompleks dapat mengumpulkan data dan informasi yang memiliki data besar, dibantu dengan pendekatan teknologi, aplikasi pengumpul *real-time*, transmisi, akses data dan analisi cepat dengan multivarian dalam jumlah besar menjadi dasar untuk mempertahankan operasi sistem tenaga listrik yang handal. Kemajuan teknologi bertujuan mengoptimalkan pengoperasian jaringan distribusi, menyederhanakan proses pemantauan transformator distribusi memastikan akurasi tinggi. Sementara IoT membantu proses pelacakan, pemantauan, pengolahan melalui koneksi internet untuk pertukaran informasi, meningkatkan platform komunikasi *smart grid*. *Cloud* memberikan solusi untuk penyimpanan data dalam jumlah besar dan memproses pekerjaan komputasi yang berat untuk kegiatan pemantauan transformator pada jaringan distribusi. Banyak penelitian telah dilaksanakan untuk memanfaatkan sistem *smart management* ini.

Transformator distribusi merupakan aset yang penting dan beban transformator distribusi diatur oleh pengguna akhir atau konsumen, yang menjadikan beban tidak dapat dikontrol ketidakpastian lebih lanjut berasal dari integrasi *photovoltaic* (PV) di tingkat distribusi serta fasilitas pengisian ulang *electric vehicle* (EV). Oleh karena itu pemantauan lebih intensif dan berkelanjutan diperlukan. Perkembangan teknologi informasi dan perangkat cerdas dapat digunakan sebagai alat tambahan sebagai monitoring secara online, *real-time* dan dengan demikian akurasi analisa kondisi transformator menjadi meningkat. Data pemantauan juga dapat dipantau didalam *cloud* dan dianalisa untuk membantu pengambilan keputusan penggantian dan pemeliharaan transformator di masa mendatang. Pemantauan secara online juga diusulkan menggunakan *global mobile service* (GSM), dengan ponsel dan mikrokontroler chip tunggal dan sensor dirancang untuk memonitor nilai arus beban, tegangan berlebih, level minyak transformator, dan suhu minyak.

Biaya investasi transformator distribusi jauh lebih rendah dari pada transformator daya. Untuk mendapatkan hasil yang berkualitas tinggi diperlukan sensor dengan kualitas tinggi. Pada transformator daya diusulkan penggunaan pemantauan secara *real-time* menggunakan infrastruktur yang canggih menggunakan *advanced metering infrastructure* (AMI). Sistem AMI diusulkan untuk mengawasi operasi transformator di bawah bahaya kebakaran, bagian utama dari sistem deteksi adalah sensor, sistem valve dan *control panel*.

Data secara *real-time* termasuk pembebanan transformator, umur, perkiraan suhu dapat diamati secara langsung. Monitoring terhadap deteksi akumulasi gas terkandung dalam transformator dapat diamati langsung dengan peralatan modern seperti *dissolved gas analysis* (DGA) yang dapat memonitor secara langsung kondisi minyak dan juga peralatan *breakdown voltage* (BDV) sangat membantu dalam hal deteksi dini kerusakan peralatan transformator daya. Tabel 4 membandingkan parameter pantau yang dipertimbangkan, kelebihan dan kekurangan teknik pemantauan real time dalam literature.

Tabel 4. Perbandingan Literature

Teknik Pemantauan		Parameter Pemantauan	Keuntungan	Kerugian
1	Pemantauan menggunakan IoT (GSM) [2, 3, 6]	1. Real time 2. Tegangan 3. Level minyak 4 Suhu minyak	Biaya rendah Dapat diandalkan	Perlu penambahan sensor level oli
2	Pemantauan kondisi menggunakan <i>thermal imager</i> [2]	1. Pencitraan image	Akurasi tinggi	Biaya tinggi
3	Penggunaan jaringan publik [19, 3, 6]	1. Suhu 2. Level minyak	Biaya rendah	Akurasi kurang
4	Penggunaan online grid energy monitoring [22, 3, 6, 8]	1. Temperature oli 2. Vibrasi 3. Power factor	Biaya rendah	Tidak presisi
5	Penggunaan multi source information fusion [23, 5, 8]	1. DGA 2. SCADA real time data 3. Spesial sensor 4. Elektrik test data 5.Operation dan repair record	Akurasi sangat tinggi, dapat memprediksi lokasi, jenis dan sifat gangguan	Perlu banyak parameter metode fusion Biaya besar
6	Advanced metering infractructure (AMI) [20, 4]	1. Beban transformator 2. Usia transformator 3. Suhu	Cocok untuk utilitas banyak untuk memantau	Perlu pemasangan perangkat smart Biaya tinggi
7	Smart transformator dengan AMI dan advance sensor infrastructure [21, 4, 5, 8]	1. DGA 2. Temperature 3. Ambient temperature 4. Real time 5. electrical parameter	Cocok untuk area luas, pengaturan manajemen aset mudah	Perlu banyak pemasangan perangkat smart Biaya tinggi
8	Wireless partial discharge diagnosis	1. Voltage pulse	Wireless Portable	Hanya untuk monitoring

[25]	Akurasi tinggi Tidak ada sensor yang dibutuhkan	dielektrik, perlu studi lanjut untuk kebisingan dan lainnya.
------	--	--

Sistem monitoring transformator berbiaya rendah wajib dipertimbangkan, jumlah transformator distribusi dan transformator daya tersebar sangat banyak dan jika terdapat kegagalan akan mengakibatkan kerugian yang sangat besar. Oleh karena itu solusi monitoring kesehatan untuk transformator haruslah berbiaya rendah tetapi dengan solusi yang canggih. Karena jumlah transformator dalam sistem tenaga listrik sangat banyak, sehingga sistem monitoring kesehatan handal dapat membantu mengurangi biaya pemeliharaan, penggantian dan pemadaman. Lebih baik daripada tidak sama sekali menjaga kesehatan transformator.

4. KESIMPULAN

Makalah ini hanya mempresentasikan studi literatur untuk membantu menentukan indikator yang paling signifikan dalam mempengaruhi operasi dan masa pakai transformator baik distribusi maupun daya. Hal ini untuk memberikan informasi lebih lanjut kepada operator transformator atau garduk tenaga listrik tentang parameter penting pada transformator yang perlu dipertimbangkan. Dan juga memberikan gambaran umum kepada penelitian lebih lanjut kepada peneliti lain mengenai proses pengembangan teknologi monitoring kondisi transformator.

Penelitian dalam beberapa tahun ini dengan jelas menunjukkan bahwa teknik pemrosesan sinyal canggih dan teknik kecerdasan buatan sangat diperlukan dalam mengembangkan sistem pemantauan real time yang baru. Pemanfaatan komputasi dan teknik telekomunikasi, pemrosesan sinyal, dan AI menjadi alat yang ampuh untuk membuat pemantauan menjadi lebih real time untuk generasi mendatang yang dilengkapi tingkat sensitivitas, keandalan, kecerdasan dan harga yang relatif lebih murah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gabriel Rodrigues Santos, Eduardo Zancul, Giovanni Manassero, Mauro Spinola, From conventional to smart substations: A classification model, *Electric Power Systems Research*, Volume 226, 2024, 109887, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109887>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623007757>)
- [2] Biçen, Yunus, and Faruk Aras. "Smart asset management system for power transformers coupled with online and offline monitoring technologies." *Engineering Failure Analysis* 154 (2023): 107674
- [3] R. Raja Singh, Ghanishtha Bhatti, D. Saravanan, New-age condition monitoring of on-load tap changing transformers in distributed energy systems for Industry 4.0, *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Volume 2, 2022, 100087, ISSN 2772-6711, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100087>.
- [4] S. Kulkarni, K. Ashok, F. Lambert and D. Divan, "Asset Monitoring using Smart Sensing and Advanced Analytics for the Distribution Network," 2019 North American

- Power Symposium (NAPS), Wichita, KS, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000254.
- [5] M. Bunn, B. -C. Seet, C. Baguley and B. Das, "A Smart Supervisory System for Distribution Transformers," 2018 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Auckland, New Zealand, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC.2018.8757994.
- [6] Murugan, Raji, and Raju Ramasamy. "Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities." *Engineering Failure Analysis* 96 (2019): 274-288. [4]
- [7] Statistik PLN. (2022). Tersedia: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2023/05/Statistik-PLN-2022-Final-2.pdf>. [Diakses: Oktober 8, 2023].
- [8] Tenbohlen, Stefan & Figel, F.. (2000). On-line condition monitoring of power transformers. 2211 - 2216 vol.3. 10.1109/PESW.2000.847699.
- [9] Suja, K., & Yuvaraj, T. (2021). Transformer Health Monitoring System Using Android Device. 2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). doi:10.1109/icees51510.2021.9383679 10.1109/icees51510.2021.9383679
- [10] D. Srivastava and M. M. Tripathi, "Transformer Health Monitoring System Using Internet of Things," 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, 2018, pp. 903-908, doi: 10.1109/ICPEICES.2018.8897325.
- [11] Roy, T. K., & Roy, T. K. (2018). Implementation of IoT: Smart Maintenance for Distribution Transformer using MQTT. 2018 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering (IC4ME2). doi:10.1109/ic4me2.2018.8465489
- [12] Jamal, H., Nadeem Khan, M. F., Anjum, A., & Janjua, M. K. (2018). Thermal Monitoring and Protection for Distribution Transformer Under Residential Loading Using Internet of Things. 2018 IEEE Global Conference on Internet of Things (GCIoT). doi:10.1109/gciot.2018.8620135 10.1109/gciot.2018.8620135
- [13] R. Zhu et al., "Smart transformer/large flexible transformer," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 264-274, Dec. 2020, doi: 10.30941/CESTEMS.2020.00033.
- [14] Mufana, Masisani William, and Adabara Ibrahim. "Monitoring with Communication Technologies of the Smart Grid." *IDOSR Journal of Applied Sciences* 7, no. 1 (2022): 102-112.
- [15] Chen, X., Hu, Y., Dong, Z., Zheng, P., & Wei, J. (2021). Transformer Operating State Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*, 21(22), 25098–25105. doi:10.1109/jsen.2021.3050763 10.1109/jsen.2021.3050763.
- [16] Ashok, K., Li, D., Divan, D., & Gebraeel, N. (2020). Distribution Transformer Health Monitoring using Smart Meter Data. 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). doi:10.1109/isgt45199.2020.9087641 10.1109/isgt45199.2020.9087641
- [17] Zhang, Chaolong, Yigang He, Bolun Du, Lifen Yuan, Bing Li, and Shanhe Jiang. "Transformer fault diagnosis method using IoT based monitoring system and ensemble machine learning." *Future generation computer systems* 108 (2020): 533-545.

- [18] Elsis, Mahmoud, Minh-Quang Tran, Karar Mahmoud, Daa-Eldin A. Mansour, Matti Lehtonen, and Mohamed MF Darwish. "Effective IoT-based deep learning platform for online fault diagnosis of power transformers against cyberattacks and data uncertainties." *Measurement* 190 (2022): 110686.
- [19] YAMAN, Okan, and Yunus BİÇEN. "An Internet of Things (IoT) based monitoring system for oil-immersed transformers." *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 7, no. 3 (2019): 226-234.
- [20] De Carne, Giovanni, Sergio Bruno, Marco Liserre, and Massimo La Scala. "Distributed online load sensitivity identification by smart transformer and industrial metering." *IEEE Transactions on Industry Applications* 55, no. 6 (2019): 7328-7337.
- [21] V. Nurmanova, M. Bagheri, A. Zollanvari, K. Aliakhmet, Y. Akhmetov and G. B. Gharehpetian, "A New Transformer FRA Measurement Technique to Reach Smart Interpretation for Inter-Disk Faults," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 4, pp. 1508-1519, Aug. 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2909144.
- [22] Giacomuzzi, Stefano, Marius Langwasser, Giovanni De Carne, Giuseppe Buja, and Marco Liserre. "Smart transformer-based medium voltage grid support by means of active power control." *CES Transactions on Electrical Machines and Systems* 4, no. 4 (2020): 285-294.
- [23] Mohamad, Auday AH, Yaqeen S. Mezaal, and Sevan F. Abdulkareem. "Computerized power transformer monitoring based on internet of things." *International Journal of Engineering & Technology* 7, no. 4 (2018): 2773-2778.
- [24] Stulov, A., Tikhonov, A., & Snitko, I. (2020). *Fundamentals of Artificial Intelligence in Power Transformers Smart Design*. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). doi:10.1109/uralcon49858.2020.9216245
- [25] Shinde, A. S., More Vaibhav Shrikant, Surawase Niket Janak, Kamble Sourabh Ashok, Sawant Dhanvanti Babasaheb, and Piralkar Prajktapramod. "SMART TRANSFORMER: DESIGN AND IMPLEMENTATION BASED ON IOT."