



Systematic Literature Review Penerapan Artificial Intelligence dalam Pemeliharaan Prediktif Sistem Tenaga Listrik sebagai Inovasi Pembelajaran Berbasis Teknologi Digital

**Rachmatul Hidayathika^{1*}, Zada Aulia Munawarah², Umar Hamzah³, Didik Aribowo⁴,
Novaldi Ramdani Reza⁵**

¹⁻⁵Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

Email: rachmatulhidayathika@gmail.com¹, aul.zada13@gmail.com², hamzahumar1114@gmail.com³,
d_aribowo@untirta.ac.id⁴, novaldiramdanireza@gmail.com⁵

*Penulis Korespondensi: rachmatulhidayathika@gmail.com

Abstract. Artificial Intelligence (AI) has become an important technology in predictive maintenance of power systems due to its ability to improve reliability, efficiency, and asset management. Conventional maintenance approaches, such as corrective and preventive maintenance, often fail to accurately predict equipment failures, resulting in higher operational costs and unplanned outages. This study aims to analyze the development, applications, benefits, challenges, and future directions of AI in predictive maintenance of power systems. The research employed a Systematic Literature Review (SLR) based on the PRISMA framework. Literature was collected from Google Scholar using keywords related to artificial intelligence, predictive maintenance, machine learning, fault diagnosis, condition monitoring, and power systems. A total of 22 publications published between 2020 and 2025 met the inclusion criteria and were analyzed. The findings indicate that AI plays a significant role in fault detection, fault diagnosis, condition monitoring, and remaining useful life prediction of power equipment. AI has been widely applied to transformers, generators, switchgear, Photovoltaic Systems, and variable frequency drives. Furthermore, the integration of AI with IoT, Big Data Analytics, Cloud Computing, and Digital Twin technologies enhances predictive accuracy and maintenance decision-making. Overall, AI contributes significantly to improving the reliability, efficiency, and sustainability of future power systems.

Keywords: Artificial Intelligence; Condition Monitoring; Machine Learning; Power Systems; Predictive Maintenance.

Abstrak. Artificial Intelligence (AI) menjadi teknologi penting dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik karena mampu meningkatkan keandalan, efisiensi, dan pengelolaan aset kelistrikan. Pendekatan pemeliharaan konvensional seperti *corrective maintenance* dan *preventive maintenance* sering kali belum mampu memprediksi kegagalan peralatan secara akurat sehingga berpotensi menimbulkan biaya operasional tinggi dan penghentian operasi yang tidak direncanakan. Penelitian ini bertujuan menganalisis perkembangan, penerapan, manfaat, tantangan, dan arah pengembangan AI dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik. Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan mengacu pada pedoman PRISMA. Literatur diperoleh melalui Google Scholar menggunakan kata kunci yang berkaitan dengan artificial intelligence, predictive maintenance, machine learning, fault diagnosis, condition monitoring, dan sistem tenaga listrik. Sebanyak 22 artikel periode 2020–2025 yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis dalam penelitian ini. Hasil kajian menunjukkan bahwa AI berperan penting dalam *fault detection*, *fault diagnosis*, *condition monitoring*, serta *remaining useful life prediction* pada berbagai peralatan tenaga listrik. Penerapan AI telah digunakan pada transformator daya, generator, *switchgear*, *Photovoltaic System*, dan *variable frequency drive*. Integrasi AI dengan IoT, *Big Data Analytics*, *Cloud Computing*, dan *Digital Twin* juga meningkatkan akurasi prediksi dan efektivitas pengambilan keputusan pemeliharaan. Secara keseluruhan, AI berkontribusi dalam meningkatkan keandalan, efisiensi, dan keberlanjutan sistem tenaga listrik.

Kata Kunci: Artificial Intelligence; Condition Monitoring; Machine Learning; Pemeliharaan Prediktif; Sistem Tenaga Listrik.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan sistem tenaga listrik yang semakin kompleks menuntut peningkatan keandalan, efisiensi, dan kontinuitas pelayanan. Kondisi ini dipengaruhi oleh meningkatnya kebutuhan energi listrik, integrasi energi terbarukan, serta digitalisasi sistem kelistrikan yang membuat peralatan bekerja dalam kondisi operasional yang lebih dinamis. Selama ini, pemeliharaan sistem tenaga listrik masih didominasi oleh *corrective maintenance* dan *preventive maintenance*. Kedua metode tersebut memiliki keterbatasan karena tidak berbasis kondisi aktual peralatan sehingga berpotensi menyebabkan biaya operasional tinggi dan kegagalan yang tidak terprediksi.

Seiring perkembangan teknologi digital, pendekatan *predictive maintenance* berbasis *Artificial Intelligence (AI)*, *Machine learning (ML)*, dan *Internet of Things (IoT)* menjadi solusi yang lebih efektif dalam meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik. Menurut Nuruzzaman et al. (2025), integrasi AI dan IoT pada transformator daya mampu meningkatkan kemampuan deteksi dini gangguan. Selain itu, Khan (2025) menunjukkan bahwa *machine learning* dapat meningkatkan akurasi diagnosis gangguan pada peralatan tenaga listrik dibandingkan metode konvensional.

Benitez dan Pahati (2025) menjelaskan bahwa penerapan AI pada sistem tegangan tinggi berperan dalam *fault detection*, *predictive maintenance*, dan optimasi sistem tenaga listrik. Hal ini diperkuat oleh Aminifar et al. (2022) yang menyatakan bahwa *machine learning* memiliki peran penting dalam manajemen aset dan sistem proteksi tenaga listrik berbasis data.

Pada berbagai peralatan seperti transformator, generator, *switchgear*, dan *Photovoltaic System*, AI telah banyak diterapkan untuk mendukung *fault diagnosis*, *condition monitoring*, dan estimasi umur pakai peralatan (Esmaeili Nezhad & Samimi, 2024; Bechara et al., 2024; Fassi et al., 2024). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada objek peralatan tertentu secara terpisah, sehingga belum memberikan gambaran komprehensif mengenai penerapan AI dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik secara menyeluruh. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan *Artificial Intelligence* dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik melalui *Systematic Literature Review (SLR)* untuk mengidentifikasi perkembangan, metode, manfaat, serta tantangan implementasinya.

2. KAJIAN TEORITIS

***Artificial Intelligence* dalam Sistem Tenaga Listrik**

Artificial Intelligence (AI) merupakan teknologi yang memungkinkan komputer atau sistem digital meniru kemampuan kognitif manusia seperti belajar, menganalisis, mengenali pola, dan mengambil keputusan berdasarkan data yang tersedia. Dalam sistem tenaga listrik, AI berkembang menjadi salah satu teknologi utama yang mendukung transformasi menuju *smart grid* dan pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*).

Benitez dan Pahati (2025) menjelaskan bahwa penerapan AI pada sistem tegangan tinggi mampu meningkatkan keandalan jaringan melalui deteksi gangguan secara dini, optimasi operasi sistem, dan pengambilan keputusan berbasis data. AI memungkinkan identifikasi pola kerusakan peralatan yang sulit dikenali menggunakan metode konvensional. Menurut Rana (2025), AI dalam sistem tenaga listrik dapat dimanfaatkan untuk *fault detection, fault diagnosis, predictive maintenance, Digital Twin*, dan self-healing grid. Teknologi tersebut memungkinkan operator melakukan tindakan pemeliharaan sebelum terjadi kegagalan peralatan sehingga risiko gangguan sistem dapat diminimalkan. Habyarimana dan Adebisi (2025) menjelaskan bahwa AI memiliki kemampuan tinggi dalam memproses data operasional peralatan listrik secara *real-time* sehingga mampu meningkatkan efisiensi, akurasi diagnosis, dan keandalan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

***Predictive maintenance* pada Sistem Tenaga Listrik**

Predictive maintenance merupakan strategi pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan prediksi kondisi peralatan menggunakan data operasional dan parameter kesehatan aset. Berbeda dengan *preventive maintenance* yang dilakukan berdasarkan jadwal tertentu, *predictive maintenance* dilakukan berdasarkan kondisi aktual peralatan. Nuruzzaman et al. (2025) menjelaskan bahwa *predictive maintenance* bertujuan memprediksi potensi kerusakan sebelum terjadi kegagalan sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan secara tepat waktu. Pendekatan ini mampu mengurangi *downtime*, menekan biaya pemeliharaan, dan meningkatkan umur operasi peralatan. Menurut Zemouri (2025), *predictive maintenance* menjadi salah satu pendekatan paling efektif dalam pengelolaan aset sistem tenaga karena mampu mengidentifikasi degradasi peralatan secara bertahap melalui analisis data historis dan data operasional. *Predictive maintenance* berbasis *machine learning* memungkinkan sistem mengenali pola kegagalan yang berulang sehingga proses perawatan menjadi lebih akurat dibandingkan metode inspeksi konvensional Amraoui, Meradi, dan Amrane (2025).

Dalam sistem tenaga listrik, *predictive maintenance* banyak diterapkan pada transformator daya, generator, motor listrik, *switchgear*, konverter daya, serta peralatan gardu induk yang memiliki peran vital dalam kontinuitas penyaluran energi listrik.

Machine learning untuk Pemeliharaan Prediktif

Machine learning (ML) merupakan cabang dari AI yang memungkinkan sistem belajar dari data tanpa harus diprogram secara eksplisit. Teknologi ini menjadi inti dari berbagai aplikasi *predictive maintenance* modern. Aminifar et al. (2022) menjelaskan bahwa *machine learning* banyak digunakan dalam sistem proteksi dan manajemen aset tenaga listrik karena mampu menganalisis data dalam jumlah besar serta menghasilkan prediksi kondisi peralatan dengan tingkat akurasi yang tinggi. Esmaeili Nezhad dan Samimi (2024) menjelaskan bahwa algoritma *machine learning* seperti *Artificial Neural Network (ANN)*, *Support Vector Machine (SVM)*, *Decision Tree*, *Random Forest*, dan *Deep Learning* telah banyak digunakan dalam monitoring kondisi transformator. Integrasi *machine learning* dengan model fisik peralatan (*Physics-Informed Machine learning*) mampu meningkatkan akurasi prediksi *Remaining Useful Life (RUL)* dan mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih tepat Fassi et al. (2024)

Machine learning juga memungkinkan pengolahan data sensor secara otomatis untuk mendeteksi anomali, mengidentifikasi pola kerusakan, dan memperkirakan waktu kegagalan peralatan sebelum terjadi gangguan yang lebih serius.

Internet of Things (IoT) dalam Condition monitoring

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi yang menghubungkan berbagai perangkat melalui jaringan internet sehingga memungkinkan proses pengumpulan, pengiriman, dan analisis data secara *real-time*. Bajwa, Tonoy, dan Khan (2025) menjelaskan bahwa IoT menjadi komponen penting dalam *predictive maintenance* karena menyediakan data operasional yang diperlukan oleh sistem AI dan *machine learning*.

Pada sistem tenaga listrik, sensor IoT digunakan untuk memantau berbagai parameter penting seperti: 1) Temperatur transformator, 2) Arus dan tegangan operasi, 3) Getaran motor listrik, 4) Kelembaban peralatan, 5) Tekanan minyak transformator, 6) Konsentrasi gas terlarut (*Dissolved Gas Analysis/DGA*). Data yang diperoleh kemudian dikirim ke pusat pengolahan data untuk dianalisis menggunakan algoritma AI guna mendeteksi potensi kerusakan secara dini.

Nuruzzaman et al. (2025) menjelaskan bahwa kombinasi AI dan IoT mampu meningkatkan efektivitas *condition monitoring* karena memungkinkan pengawasan kondisi peralatan secara berkelanjutan tanpa memerlukan inspeksi manual yang terlalu sering.

Pemeliharaan Prediktif pada Transformator Daya

Transformator daya merupakan salah satu aset paling kritis dalam sistem tenaga listrik sehingga menjadi objek utama penerapan *predictive maintenance*. Khan (2025) menjelaskan bahwa diagnosis gangguan transformator berbasis AI mampu meningkatkan akurasi identifikasi kerusakan dibandingkan metode konvensional. Algoritma *machine learning* dapat digunakan untuk menganalisis data *Dissolved Gas Analysis* (DGA) guna mendeteksi gangguan internal transformator. Bazi, Nhaila, dan El Khaili (2024) menjelaskan bahwa penggunaan AI dalam analisis DGA, *Frequency Response Analysis* (FRA), dan *Partial Discharge Analysis* mampu mempercepat proses diagnosis serta meningkatkan akurasi identifikasi gangguan. Zemouri (2025) menjelaskan bahwa pendekatan *Prognostics and Health Management* (PHM) berbasis *machine learning* memungkinkan estimasi sisa umur operasi transformator sehingga membantu perusahaan listrik dalam menyusun strategi pemeliharaan yang lebih efektif.

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa penerapan AI pada transformator daya dapat meningkatkan keandalan sistem serta mengurangi risiko kegagalan yang dapat menyebabkan gangguan pasokan listrik.

Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai penerapan AI dalam *predictive maintenance* sistem tenaga listrik telah dilakukan oleh berbagai peneliti. Nuruzzaman et al. (2025) menunjukkan bahwa integrasi AI dan IoT pada transformator daya mampu meningkatkan efektivitas *condition monitoring* serta mengurangi risiko kegagalan peralatan. Khan (2025) menjelaskan bahwa *machine learning* memiliki potensi besar dalam diagnosis gangguan transformator melalui analisis data operasional dan data DGA.

Aminifar et al. (2022) menunjukkan bahwa *machine learning* dapat meningkatkan efektivitas asset management dan sistem proteksi tenaga listrik melalui kemampuan prediksi kondisi peralatan. Esmaeili Nezhad dan Samimi (2024) menemukan bahwa berbagai algoritma *machine learning* memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam memantau kondisi transformator daya. Benitez dan Pahati (2025) menunjukkan bahwa AI pada sistem tegangan tinggi mampu meningkatkan keandalan jaringan melalui *fault detection* dan *predictive maintenance*.

Rana (2025) menjelaskan bahwa kombinasi AI, *Digital Twin*, dan *smart grid* menjadi arah pengembangan utama *predictive maintenance* pada sistem tenaga listrik modern. Secara umum, berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa AI memiliki potensi besar dalam meningkatkan efektivitas pemeliharaan sistem tenaga listrik melalui kemampuan diagnosis, prediksi, dan monitoring kondisi peralatan secara *real-time*. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada jenis peralatan tertentu seperti transformator, generator, atau *switchgear* secara terpisah.

Kerangka Konseptual Penelitian

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, penelitian ini mengintegrasikan empat komponen utama dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik, yaitu: 1) *Artificial Intelligence (AI)* sebagai teknologi utama analisis data, 2) *Machine learning (ML)* sebagai metode prediksi kondisi dan kegagalan peralatan, 3) *Internet of Things (IoT)* sebagai penyedia data operasional secara *real-time*, 4) *Condition monitoring* sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan.

Keempat komponen tersebut membentuk sistem *predictive maintenance* yang mampu mendeteksi gangguan secara dini, memperkirakan umur pakai peralatan, mengurangi *downtime*, meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik, serta menekan biaya operasi dan pemeliharaan.

Dengan demikian, pemanfaatan *Artificial Intelligence* dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik menjadi pendekatan yang sangat potensial untuk mendukung transformasi pengelolaan aset kelistrikan menuju sistem yang lebih cerdas, efisien, dan andal.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review (SLR)* untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil-hasil penelitian yang berkaitan dengan penerapan *Artificial Intelligence (AI)* dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik. Menurut Sugiyono (2021), studi kepustakaan merupakan teknik pengumpulan data yang dilakukan melalui penelaahan berbagai sumber ilmiah, seperti buku, jurnal, laporan penelitian, dan dokumen lainnya yang relevan untuk memperoleh landasan teoritis yang kuat. Dalam penelitian ini, studi kepustakaan dilakukan secara sistematis menggunakan pendekatan SLR untuk menghasilkan kajian yang komprehensif, objektif, dan dapat dipertanggungjawabkan. *Systematic Literature Review* merupakan metode penelitian yang digunakan untuk mengidentifikasi, menyeleksi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti ilmiah secara sistematis (Page et al., 2021).

Selain itu, Paul et al. (2021) menjelaskan bahwa SLR dilakukan melalui prosedur yang terstruktur dan terdokumentasi sehingga menghasilkan kajian yang objektif dan dapat direplikasi. Oleh karena itu, metode SLR dipilih karena mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan teknologi *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Internet of Things* (IoT), dan *predictive maintenance* dalam sistem tenaga listrik.

Proses pencarian literatur dilakukan melalui basis data Google Scholar pada bulan Mei 2026 dengan menggunakan beberapa kata kunci, yaitu “*Artificial Intelligence AND Predictive Maintenance AND Power System*”, “*AI-Based Predictive Maintenance AND Electrical Power System*”, “*Machine Learning AND Condition Monitoring AND Power Transformer*”, “*Artificial Intelligence AND Fault Diagnosis AND Electrical Equipment*”, “*Predictive Maintenance AND Smart Grid*”, dan “*IoT AND Predictive Maintenance AND Power Transformer*”. Pencarian juga dilakukan dengan berbagai kombinasi kata kunci lain yang relevan menggunakan operator Boolean (AND dan OR) untuk memperoleh literatur yang sesuai dengan fokus penelitian.

Tahapan penelitian mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020 yang terdiri atas empat tahap utama, yaitu *identification*, *screening*, *eligibility*, dan *inclusion* (Page et al., 2021). Pada tahap *identification*, diperoleh sebanyak 8.240 artikel dari hasil pencarian. Setelah dilakukan pembatasan tahun publikasi pada rentang 2020–2025, jumlah artikel yang memenuhi kriteria awal menjadi 6.080 artikel.

Tahap *screening* dilakukan dengan menyeleksi judul, kata kunci, dan abstrak artikel sehingga diperoleh 215 artikel yang relevan dengan topik penelitian. Selanjutnya, artikel yang tidak sesuai dengan fokus penelitian, terduplikasi, tidak tersedia dalam bentuk full text, atau membahas penerapan *Artificial Intelligence* di luar bidang sistem tenaga listrik dikeluarkan dari proses seleksi. Pada tahap *eligibility*, dilakukan penelaahan secara menyeluruh (*full-text review*) terhadap 25 artikel yang memenuhi kriteria awal.

Adapun kriteria inklusi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: (1) artikel membahas penerapan *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Deep Learning*, atau *Internet of Things* dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik; (2) diterbitkan pada periode 2020–2025; (3) tersedia dalam bentuk *full text*; (4) merupakan artikel jurnal internasional, prosiding konferensi internasional, atau publikasi akademik yang relevan; serta (5) memiliki keterkaitan dengan transformator daya, generator, *switchgear*, motor listrik, *power converter*, *smart grid*, maupun peralatan sistem tenaga listrik lainnya.

Berdasarkan hasil proses seleksi, sebanyak 22 artikel dinyatakan memenuhi seluruh kriteria inklusi dan digunakan dalam analisis akhir. Artikel-artikel tersebut berasal dari jurnal internasional bereputasi, prosiding IEEE, jurnal terindeks Scopus, Springer, MDPI, SSRN, serta berbagai publikasi ilmiah lainnya yang relevan dengan topik penelitian.

Data yang telah terkumpul dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif melalui proses identifikasi tema, pengelompokan hasil penelitian, analisis perbandingan temuan, dan sintesis konsep. Analisis difokuskan pada beberapa aspek utama, yaitu penerapan AI untuk *fault detection*, *fault diagnosis*, *condition monitoring*, *remaining useful life prediction*, integrasi AI dengan IoT, serta dampaknya terhadap peningkatan keandalan dan efisiensi pemeliharaan sistem tenaga listrik.

Untuk mempermudah proses sintesis, hasil penelitian dikelompokkan ke dalam lima tema utama, yaitu: (1) penerapan AI untuk diagnosis gangguan transformator daya; (2) penggunaan *Machine Learning* dalam *condition monitoring* peralatan tenaga listrik; (3) integrasi IoT dan AI dalam *predictive maintenance*; (4) penerapan *Deep Learning* pada deteksi gangguan sistem tenaga listrik; dan (5) perkembangan teknologi *smart maintenance* berbasis AI pada sistem tenaga listrik modern.



Gambar 1. Diagram Alur Seleksi Literatur Menggunakan Metode PRISMA.

Berdasarkan Gambar 1, menunjukkan proses seleksi artikel berdasarkan pedoman PRISMA. Pada tahap identifikasi diperoleh 8.240 artikel dari Google Scholar. Setelah pembatasan tahun publikasi 2020-2025 diperoleh 6.080 artikel. Tahap penyaringan menghasilkan 215 artikel yang relevan berdasarkan judul dan abstrak. Selanjutnya dilakukan evaluasi kelayakan terhadap 25 artikel *full-text* dan diperoleh 22 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi untuk dianalisis lebih lanjut.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan proses penelusuran literatur melalui Google Scholar menggunakan kata kunci yang berkaitan dengan *artificial intelligence*, *machine learning*, *predictive maintenance*, *condition monitoring*, *fault diagnosis*, power systems, dan electrical equipment, diperoleh sejumlah publikasi yang memenuhi kriteria inklusi penelitian. Setelah melalui tahapan seleksi berdasarkan metode PRISMA, sebanyak 22 artikel digunakan dalam analisis akhir.

Literatur yang terpilih berasal dari jurnal internasional bereputasi, prosiding IEEE, dan publikasi ilmiah lainnya yang membahas penerapan *Artificial Intelligence (AI)* dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik pada periode 2021–2025. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkembangan AI telah membawa perubahan signifikan terhadap strategi pemeliharaan peralatan tenaga listrik yang sebelumnya didominasi oleh pendekatan preventif dan korektif.

Analisis literatur kemudian dikelompokkan ke dalam beberapa tema utama, yaitu kondisi pemeliharaan sistem tenaga listrik konvensional, peran *Artificial Intelligence* dalam pemeliharaan prediktif, penerapan AI pada berbagai peralatan sistem tenaga listrik, tantangan implementasi AI, serta implikasi pengembangan teknologi AI dalam sektor ketenagalistrikan.

Kondisi Pemeliharaan Sistem Tenaga Listrik di Era Digital

Sistem tenaga listrik modern menghadapi tantangan peningkatan kompleksitas operasi akibat pertumbuhan kebutuhan energi, integrasi energi terbarukan, serta digitalisasi sistem kelistrikan. Kondisi tersebut menuntut strategi pemeliharaan yang lebih efektif dibandingkan pendekatan *corrective maintenance* dan *preventive maintenance* yang masih banyak digunakan. Perkembangan sensor, *Internet of Things (IoT)*, dan teknologi komputasi memungkinkan pengumpulan data kondisi peralatan secara *real-time*. Data tersebut dapat dimanfaatkan untuk mendukung *predictive maintenance* berbasis *Artificial Intelligence* sehingga potensi gangguan dapat dideteksi lebih awal dan keandalan sistem tenaga listrik dapat ditingkatkan.

Peran *Artificial Intelligence* dalam Pemeliharaan Prediktif Sistem Tenaga Listrik

Artificial Intelligence merupakan teknologi yang memungkinkan komputer melakukan proses analisis, pembelajaran, dan pengambilan keputusan secara otomatis berdasarkan data yang tersedia. Dalam konteks pemeliharaan prediktif, AI digunakan untuk menganalisis data historis maupun data *real-time* guna mengidentifikasi pola kerusakan, memprediksi kegagalan peralatan, serta menentukan waktu pemeliharaan yang paling optimal.

Rana (2025) menjelaskan bahwa kombinasi AI, *machine learning*, *Deep Learning*, dan *Digital Twin* memungkinkan sistem tenaga listrik berkembang menuju konsep *self-healing grid*, yaitu jaringan listrik yang mampu mendeteksi dan merespons gangguan secara otomatis. Benitez dan Pahati (2025) menjelaskan bahwa AI mampu meningkatkan akurasi deteksi gangguan pada sistem tegangan tinggi melalui analisis data operasional yang kompleks. Teknologi ini juga mampu mengurangi risiko kesalahan manusia dalam proses inspeksi dan diagnosis gangguan. Amraoui, Meradi, dan Amrane (2025) menjelaskan bahwa algoritma *machine learning* dapat digunakan untuk mempelajari pola kerusakan mesin listrik berdasarkan parameter seperti suhu, getaran, arus, tegangan, dan kondisi isolasi.

Berdasarkan hasil analisis literatur, fungsi utama AI dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi empat aspek utama sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Fungsi *Artificial Intelligence* dalam Pemeliharaan Prediktif Sistem Tenaga Listrik.

No	Fungsi AI	Manfaat
1	<i>Fault detection</i>	Mendeteksi gangguan lebih dini
2	<i>Fault diagnosis</i>	Mengidentifikasi jenis dan lokasi gangguan
3	<i>Condition monitoring</i>	Memantau kondisi peralatan secara <i>real-time</i>
4	<i>Remaining useful life prediction</i>	Memperkirakan sisa umur pakai peralatan

Berdasarkan Tabel 1, sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa AI tidak hanya digunakan untuk mendeteksi kerusakan, tetapi juga mampu memperkirakan kapan kerusakan akan terjadi sehingga pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih efektif.

Penerapan AI pada Peralatan Sistem Tenaga Listrik

Tabel 2. Penerapan AI pada Peralatan Listrik Sistem Tenaga Listrik.

No.	Peralatan	Metode AI yang Digunakan	Fungsi Utama
1	Transformator Daya	<i>Machine learning</i> , ANN, DGA Analysis	<i>Fault diagnosis</i> , <i>condition monitoring</i> , estimasi umur pakai
2	<i>Switchgear</i> Tegangan Menengah	<i>Deep Learning</i>	<i>Fault detection</i> dan monitoring kondisi
3	Generator Sinkron	ANN, SVM, <i>Deep Learning</i>	Diagnosis dan prognosis kerusakan
4	Motor Listrik	<i>Machine learning</i>	Prediksi kegagalan berdasarkan suhu dan getaran
5	<i>Photovoltaic System</i> (PV)	<i>Deep Learning</i>	Deteksi degradasi dan <i>fault diagnosis</i>
6	<i>Variable Frequency Drive</i> (VFD)	AI/ML	Prediksi kegagalan komponen
7	Peralatan Tegangan Tinggi	<i>Machine learning</i>	Identifikasi anomali dan <i>predictive maintenance</i>

Berdasarkan Tabel 2, AI telah diterapkan pada berbagai peralatan sistem tenaga listrik seperti transformator, generator, *switchgear*, motor listrik, dan sistem fotovoltaik untuk mendukung deteksi gangguan, pemantauan kondisi, serta prediksi kegagalan peralatan.

Teknologi Pendukung Pemeliharaan Prediktif Berbasis AI

Keberhasilan implementasi AI dalam pemeliharaan prediktif tidak terlepas dari dukungan teknologi lainnya. Berdasarkan hasil kajian literatur, terdapat beberapa teknologi utama yang sering diintegrasikan dengan AI sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Teknologi Pendukung Pemeliharaan Prediktif Berbasis AI.

No	Teknologi	Fungsi
1	<i>Internet of Things (IoT)</i>	Akuisisi data sensor secara <i>real-time</i>
2	<i>Big Data Analytics</i>	Pengolahan data dalam jumlah besar
3	<i>Cloud Computing</i>	Penyimpanan dan pemrosesan data
4	<i>Digital Twin</i>	Simulasi kondisi peralatan secara virtual
5	<i>Deep Learning</i>	Analisis pola kerusakan kompleks
6	<i>Physics-Informed Machine learning</i>	Kombinasi model fisik dan AI

Berdasarkan Tabel 3, keberhasilan AI dalam pemeliharaan prediktif didukung oleh IoT, *Big Data Analytics*, *Cloud Computing*, *Digital Twin*, *Deep Learning*, dan PIML. Integrasi teknologi tersebut memungkinkan pemantauan kondisi peralatan secara real-time dan meningkatkan akurasi prediksi pemeliharaan.

Tantangan Implementasi *Artificial Intelligence* dalam Pemeliharaan Prediktif

Memerlukan validasi jangka panjang untuk memastikan keandalan model prediksi.

Tabel 4. Tantangan Implementasi *Artificial Intelligence* dalam Pemeliharaan Prediktif.

No	Tantangan	Dampak terhadap Implementasi
1	Keterbatasan data historis	Menurunkan akurasi model prediksi
2	Kualitas data yang rendah	Mengurangi keandalan hasil analisis
3	Biaya investasi tinggi	Menghambat adopsi teknologi AI
4	Keterbatasan tenaga ahli	Menyulitkan pengembangan dan operasional sistem
5	Integrasi dengan sistem lama	Menambah kompleksitas implementasi
6	Risiko keamanan siber	Mengancam keamanan data operasional

Berdasarkan Tabel 4, implementasi AI dalam pemeliharaan prediktif sistem tenaga listrik menghadapi kendala berupa keterbatasan data, tingginya biaya infrastruktur, kurangnya SDM yang kompeten, serta risiko keamanan *cyber*, sehingga diperlukan pengelolaan data, peningkatan SDM, dan penguatan keamanan sistem.

Implikasi Penelitian

Hasil kajian menunjukkan bahwa *Artificial Intelligence* memiliki potensi besar dalam meningkatkan efektivitas pemeliharaan sistem tenaga listrik melalui kemampuan *fault detection*, *fault diagnosis*, *condition monitoring*, dan *remaining useful life prediction*.

Pemanfaatan AI memungkinkan proses pemeliharaan dilakukan berdasarkan kondisi aktual peralatan sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem sekaligus mengurangi biaya operasional. Selain itu, integrasi AI dengan IoT, *Big Data Analytics*, *Cloud Computing*, dan *Digital Twin* membuka peluang pengembangan sistem *smart maintenance* yang lebih adaptif dan berbasis data.

Temuan ini menunjukkan bahwa transformasi digital melalui penerapan *Artificial Intelligence* menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung pengembangan sistem tenaga listrik yang andal, efisien, dan berkelanjutan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *Artificial Intelligence (AI)* memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan sistem pemeliharaan prediktif pada sistem tenaga listrik. Teknologi AI mampu meningkatkan efektivitas proses pemeliharaan melalui kemampuan mendeteksi gangguan secara dini (*fault detection*), mendiagnosis kerusakan (*fault diagnosis*), memantau kondisi peralatan secara real-time (*condition monitoring*), serta memprediksi sisa umur pakai peralatan (*remaining useful life prediction*). Pemanfaatan AI memungkinkan perusahaan ketenagalistrikan melakukan pemeliharaan berdasarkan kondisi aktual peralatan sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan sistem, menekan biaya operasional, dan meningkatkan keandalan penyaluran energi listrik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan AI telah banyak digunakan pada berbagai peralatan sistem tenaga listrik, seperti transformator daya, generator, motor listrik, *switchgear*, *Photovoltaic System*, *Variable Frequency Drive (VFD)*, serta peralatan tegangan tinggi lainnya. Berbagai metode AI yang banyak digunakan meliputi *Machine learning*, *Deep Learning*, *Artificial Neural Network (ANN)*, *Support Vector Machine (SVM)*, dan *Physics-Informed Machine Learning (PIML)*.

Integrasi AI dengan teknologi pendukung seperti *Internet of Things (IoT)*, *Big Data Analytics*, *Cloud Computing*, dan *Digital Twin* juga terbukti mampu meningkatkan akurasi prediksi kondisi peralatan dan efektivitas pengambilan keputusan pemeliharaan. Meskipun demikian, implementasi AI dalam pemeliharaan prediktif masih menghadapi berbagai tantangan. Beberapa kendala yang ditemukan dalam literatur antara lain keterbatasan kualitas dan ketersediaan data historis, tingginya biaya investasi infrastruktur digital, kebutuhan tenaga ahli yang memiliki kompetensi di bidang sistem tenaga listrik dan kecerdasan buatan, serta isu keamanan siber pada sistem pemantauan berbasis digital.

Oleh karena itu, keberhasilan implementasi AI tidak hanya bergantung pada kecanggihan algoritma, tetapi juga pada kesiapan sumber daya manusia, infrastruktur teknologi, dan tata kelola data yang baik. Penelitian ini memiliki keterbatasan karena menggunakan metode *Systematic Literature Review (SLR)* sehingga hasil yang diperoleh bergantung pada kualitas, ruang lingkup, dan ketersediaan publikasi ilmiah yang dianalisis.

Selain itu, penelitian ini belum melakukan pengujian empiris terhadap performa berbagai algoritma AI pada kondisi nyata sistem tenaga listrik maupun membandingkan tingkat akurasi masing-masing metode dalam memprediksi kegagalan peralatan.

Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan studi empiris melalui pengujian langsung pada peralatan sistem tenaga listrik seperti transformator, generator, *switchgear*, dan motor listrik. Penelitian juga dapat difokuskan pada pengembangan model AI yang lebih akurat dengan memanfaatkan data operasional *real-time* serta integrasi teknologi *Digital Twin* dan *Internet of Things (IoT)*. Selain itu, diperlukan kajian lebih lanjut mengenai aspek keamanan siber, keandalan sistem, serta strategi implementasi AI yang sesuai dengan kebutuhan industri ketenagalistrikan di Indonesia guna mendukung transformasi menuju sistem tenaga listrik yang lebih cerdas, andal, efisien, dan berkelanjutan.

DAFTAR REFERENSI

- Alsumaidae, Y. A. M., Yaw, C. T., Koh, S. P., Tiong, S. K., Chen, C. P., & Ali, K. (2022). Review of medium-voltage *switchgear* fault detection in a condition-based monitoring system by using *Deep Learning*. *Energies*, 15(18), 6762. <https://doi.org/10.3390/en15186762>
- Aminifar, F., Abedini, M., Amraee, T., et al. (2022). A review of power system protection and asset management with *machine learning* techniques. *Energy Systems*, 13(4), 855–892. <https://doi.org/10.1007/s12667-021-00448-6>
- Amraoui, T., Meradi, S., & Amrane, A. (2025). *Machine learning for predictive maintenance* of electrical machines: A review. Proceedings of the International Conference on Intelligent Computer Systems, Data Science and Applications (IC2SDA), 1–8. <https://doi.org/10.1109/IC2SDA68097.2025.11331563>
- Bajwa, A., Tonoy, A. A. R., & Khan, M. A. M. (2025). IoT-enabled *condition monitoring* in power transformers: A proposed model. Review of Applied Science and Technology, 4(2). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5341323>
- Bazi, S., Nhaila, H., & El Khaili, M. (2024). Artificial intelligence for diagnosing power transformer faults. Proceedings of the 4th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), 1–8. <https://doi.org/10.1109/IRASET60544.2024.10548561>
- Bechara, H., et al. (2024). Review of artificial intelligence methods for faults monitoring, diagnosis, and prognosis in hydroelectric synchronous generators. *IEEE Access*, 12, 173599–173617. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3502546>
- Benitez, I. B., & Pahati, M. D. (2025). Transformative AI technologies in high-voltage systems: A review of advances in *predictive maintenance*, *fault detection*, and grid optimization. Proceedings of the IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET), 368–373. <https://doi.org/10.1109/IICAIET67254.2025.11265217>

- Cui, Y., Butler, R., Liu, Z., Jaremko, T., & Hinds, S. (2025). The future of *predictive maintenance* for variable frequency drives based on AI/ML. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 61(4), 6833–6841. <https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3550104>
- Esmaili Nezhad, A., & Samimi, M. (2024). A review of the applications of *machine learning* in the *condition monitoring* of transformers. *Energy Systems*, 15(2), 463–493. <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00532-5>
- Fassi, Y., Heiries, V., Boutet, J., & Boisseau, S. (2024). Toward physics-informed machine-learning-based *predictive maintenance* for power converters—A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(2), 2692–2720. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3328438>
- Fylladitakis, E. D. (2025). Fault identification and *predictive maintenance* techniques for high-voltage equipment: A review and recent advances. *Journal of Power and Energy Engineering*, 13, 1–39. <https://doi.org/10.4236/jpee.2025.137001>
- Gandhi, K., & Verma, P. (2024). *Predictive maintenance* for transformers and substation equipment using sensor time-series models. *American Journal of Computing and Engineering*, 7(5), 33–35.
- Garcia, J., Rios-Colque, L., Peña, A., & Rojas, L. (2025). *Condition monitoring* and *predictive maintenance* in industrial equipment: An NLP-assisted review of signal processing, hybrid models, and implementation challenges. *Applied Sciences*, 15(10), 5465. <https://doi.org/10.3390/app15105465>
- Habyarimana, M., & Adebisi, A. A. (2025). A review of artificial intelligence applications in predicting faults in electrical machines. *Energies*, 18(7), 1616. <https://doi.org/10.3390/en18071616>
- Khan, M. A. M. (2025). AI and *machine learning* in transformer *fault diagnosis*: A systematic review. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5190585>
- Mansouri, M., Trabelsi, M., Nounou, H., & Nounou, M. (2021). *Deep Learning*-based *fault diagnosis* of *Photovoltaic Systems*: A comprehensive review and enhancement prospects. *IEEE Access*, 9, 126286–126306. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110947>
- Nuruzzaman, M., Limon, G. Q., Chowdhury, A. R., & Khan, M. A. M. (2025). *Predictive maintenance* in power transformers: A systematic review of AI and IoT applications. *ASRC Procedia: Global Perspectives in Science and Scholarship*, 1(1), 34–47. <https://doi.org/10.63125/r72yd809>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paul, J., Lim, W. M., O'Cass, A., Hao, A. W., & Bresciani, S. (2021). Scientific procedures and rationales for systematic literature reviews (SPAR-4-SLR). *International Journal of Consumer Studies*, 45(4), O1–O16. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12695>
- Rana, S. (2025). AI-driven *fault detection* and *predictive maintenance* in electrical power systems: A systematic review of data-driven approaches, *Digital Twins*, and self-healing grids. *American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions*, 1(1), 258–289. <https://doi.org/10.63125/4p25x993>

- Shamim, M. M. R., & Ruddro, R. A. (2025). Smart diagnostics in industrial maintenance: A systematic review of AI-enabled *predictive maintenance* tools and *condition monitoring* techniques. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.5269918>
- Sugiyono. (2021). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
- Vichare, R. V., & Gaikwad, S. R. (2025). AI-based *predictive maintenance* of solar photovoltaics systems: A comprehensive review. *Energy Informatics*, 8, 128.
<https://doi.org/10.1186/s42162-025-00594-6>
- Zemouri, R. (2025). Power transformer prognostics and health management using *machine learning*: A review and future directions. *Machines*, 13(2), 125.
<https://doi.org/10.3390/machines13020125>