



Analisis Pemanfaatan Teknologi Digital dalam Pemeliharaan Sistem Tenaga Listrik

(Literature Review terhadap Implementasi Predictive Maintenance)

Fiana^{1*}, Ardian Nurarifin², Muhamad Taufiq Hidayatullah Syari³, Muhamad Rifki Arrosyid⁴, Didik Aribowo⁵

¹⁻⁵Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

Email: ffiana708@gmail.com¹, ardianarifin62@gmail.com², 2283230009@untirta.ac.id³, 2283230038@untirta.ac.id⁴, d_aribowo@untirta.ac.id⁵

*Penulis Korespondensi: ffiana708@gmail.com

Abstract. The rapid advancement of digital technologies has transformed maintenance practices in electric power systems, encouraging a shift from conventional approaches toward predictive maintenance strategies. This study examines the role of digital technologies in supporting predictive maintenance through a comprehensive literature review. The research was conducted by analyzing scientific journals, conference papers, and scholarly articles discussing the application of Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), machine learning, SCADA, and digital twin technologies in power system maintenance. The review indicates that predictive maintenance contributes to improved system reliability, reduced equipment downtime, lower maintenance expenditures, and enhanced operational efficiency through continuous monitoring and data-based decision making. Furthermore, digital technologies facilitate earlier fault identification and more effective maintenance scheduling. Despite these benefits, several challenges remain, including cybersecurity concerns, investment requirements for digital infrastructure, and the need for skilled personnel. The findings of this study provide insights that may support the development of more intelligent, efficient, and reliable power systems in the future.

Keywords: Artificial Intelligence; Digital Transformation; Power Systems; Predictive Maintenance; Smart Grid.

Abstrak. Perkembangan teknologi digital telah membawa perubahan pada praktik pemeliharaan sistem tenaga listrik, sehingga mendorong peralihan dari metode konvensional menuju pendekatan *predictive maintenance*. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan teknologi digital dalam pemeliharaan sistem tenaga listrik melalui studi literatur. Metode yang digunakan berupa kajian literatur dengan menelaah berbagai jurnal ilmiah, prosiding, dan artikel penelitian yang membahas penerapan Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), *machine learning*, SCADA, dan *digital twin* dalam kegiatan pemeliharaan. Hasil kajian menunjukkan bahwa *predictive maintenance* mampu meningkatkan keandalan sistem, mengurangi waktu henti peralatan, menekan biaya pemeliharaan, serta meningkatkan efisiensi operasional melalui pemantauan berkelanjutan dan pengambilan keputusan berbasis data. Selain itu, pemanfaatan teknologi digital mendukung deteksi gangguan secara lebih dini dan perencanaan pemeliharaan yang lebih efektif. Meskipun demikian, implementasinya masih menghadapi sejumlah kendala, seperti risiko keamanan siber, kebutuhan investasi infrastruktur yang relatif tinggi, dan keterbatasan kompetensi sumber daya manusia. Temuan penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan referensi dalam pengembangan sistem tenaga listrik yang lebih cerdas, efisien, dan andal.

Kata Kunci: Artificial Intelligence; Predictive Maintenance; Sistem Tenaga Listrik; Smart Grid; Transformasi Digital.

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi digital pada era Industri 4.0 telah membawa perubahan besar pada berbagai sektor industri, termasuk sektor ketenagalistrikan. Digitalisasi sistem tenaga listrik diwujudkan melalui penerapan jaringan cerdas (smart grid), Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI), machine learning, serta sistem monitoring berbasis data real-time guna meningkatkan kinerja dan keandalan sistem kelistrikan (Mahmoud et al., 2021).

Perubahan ini turut menggeser pendekatan pengelolaan dan pemeliharaan sistem tenaga listrik dari metode tradisional menuju pemanfaatan teknologi yang lebih cerdas dan terintegrasi. Sistem tenaga listrik berfungsi sebagai sarana utama dalam proses pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik. Oleh karena itu, keandalan operasinya perlu dipertahankan agar penyaluran daya kepada konsumen dapat berlangsung secara berkesinambungan. Gangguan pada peralatan listrik seperti transformator, generator, jaringan distribusi, dan sistem kontrol dapat menyebabkan penurunan kualitas pelayanan bahkan pemadaman listrik. Oleh sebab itu, pemeliharaan sistem tenaga listrik perlu dilakukan secara optimal untuk memastikan sistem tetap beroperasi secara stabil dan mengurangi potensi gangguan yang dapat menyebabkan downtime (Harianja et al., 2024).

Metode pemeliharaan tradisional, seperti *corrective maintenance* dan *preventive maintenance*, masih menghadapi sejumlah kendala. Pada *corrective maintenance*, tindakan perbaikan baru dilakukan setelah peralatan mengalami kerusakan, sehingga berpotensi meningkatkan risiko gangguan yang dapat memengaruhi kinerja sistem secara lebih luas. Sementara itu, *preventive maintenance* dilakukan berdasarkan jadwal pemeriksaan berkala tanpa mempertimbangkan kondisi aktual peralatan. Selain itu, proses pemeriksaan manual membutuhkan waktu, biaya operasional, dan tenaga kerja yang relatif besar sehingga kurang efektif dalam mendeteksi kerusakan secara dini (Suryadarma & Ai, 2020).

Seiring berkembangnya transformasi digital, *predictive maintenance* mulai dikembangkan sebagai metode pemeliharaan modern berbasis kondisi peralatan. *Predictive maintenance* memanfaatkan data operasional yang diperoleh secara real-time melalui sensor digital untuk memprediksi kemungkinan kerusakan sebelum gangguan terjadi. Pendekatan ini memungkinkan pemantauan kondisi sistem dilakukan secara berkelanjutan dan otomatis, sehingga kegiatan pemeliharaan dapat dilaksanakan dengan lebih efektif serta membantu menekan potensi terjadinya downtime pada sistem tenaga listrik (Samatas et al., 2021).

Implementasi *predictive maintenance* didukung oleh berbagai teknologi digital seperti Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), machine learning, SCADA, digital twin, dan sensor pintar. Teknologi IoT berperan dalam memperoleh data kondisi peralatan secara langsung dan berkelanjutan, sementara AI dan *machine learning* dimanfaatkan untuk mengolah data yang telah terkumpul guna mengenali kecenderungan serta memperkirakan potensi kerusakan pada peralatan listrik sebelum gangguan terjadi. Selain itu, sistem SCADA dan digital twin membantu proses monitoring serta simulasi kondisi sistem tenaga listrik secara lebih akurat dan terintegrasi (Rana, 2025).

Hasil berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penerapan *predictive maintenance* memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Selain itu, pendekatan ini juga dapat mengurangi tingkat terjadinya gangguan dan mendukung peningkatan efisiensi dalam pengoperasian sistem tenaga listrik (Harianja et al., 2024). Penelitian lain juga menunjukkan bahwa integrasi AI dan IoT pada smart grid dapat meningkatkan kemampuan deteksi gangguan dan mempercepat pengambilan keputusan pemeliharaan sistem (Omowaye et al., 2025). Namun demikian, penelitian yang membahas secara khusus mengenai analisis pemanfaatan teknologi digital dalam predictive maintenance pada sistem tenaga listrik melalui pendekatan studi literatur masih relatif terbatas.

Berdasarkan dari permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pemanfaatan teknologi digital dalam kegiatan pemeliharaan sistem tenaga listrik melalui telaah berbagai literatur yang membahas penerapan *predictive maintenance*. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai perkembangan transformasi digital pada bidang pemeliharaan sistem tenaga listrik serta menjadi salah satu sumber rujukan dalam pengembangan sistem tenaga listrik yang lebih cerdas di masa depan.

2. KAJIAN TEORITIS

Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang berperan dalam proses pembangkitan, penyaluran, dan pendistribusian energi listrik hingga sampai kepada pengguna. Sistem ini tersusun atas tiga bagian utama, yaitu pembangkit, transmisi, dan distribusi. Pada tahap pembangkitan, energi listrik dihasilkan dari berbagai sumber energi yang tersedia. Energi tersebut kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi bertegangan tinggi menuju gardu induk. Setelah itu, sistem distribusi bertugas mengalirkan energi listrik dari gardu induk kepada konsumen dengan tingkat tegangan yang telah disesuaikan dengan kebutuhan pengguna (Stevenson, 2013).

Keandalan sistem tenaga listrik menjadi aspek penting karena sistem harus mampu beroperasi secara kontinu dan stabil. Gangguan pada salah satu komponen sistem dapat menyebabkan penurunan kualitas pelayanan bahkan pemadaman listrik. Untuk mendukung keandalan operasional sistem, diperlukan strategi pemeliharaan yang tepat agar kondisi peralatan tetap terjaga dengan baik serta potensi gangguan pada sistem tenaga listrik dapat diminimalkan (Mahmoud et al., 2021).

Pemeliharaan Sistem Tenaga Listrik

Pemeliharaan sistem tenaga listrik merupakan serangkaian kegiatan yang bertujuan untuk mempertahankan kinerja serta kondisi peralatan agar dapat beroperasi secara andal dan sesuai dengan fungsinya. Pemeliharaan bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem, memperpanjang umur peralatan, serta mengurangi kemungkinan terjadinya gangguan.

Secara umum, metode pemeliharaan dibagi menjadi *corrective maintenance*, *preventive maintenance*, dan *predictive maintenance*. *Corrective maintenance* merupakan metode pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan pada peralatan. Metode ini memiliki kelemahan karena dapat menyebabkan downtime sistem yang tinggi dan biaya perbaikan yang besar (Mobley, 2002).

Preventive maintenance merupakan metode pemeliharaan yang dilakukan secara berkala berdasarkan jadwal tertentu. Metode ini lebih baik dibanding *corrective maintenance* karena mampu mengurangi risiko kerusakan mendadak. Namun demikian, *preventive maintenance* masih memiliki keterbatasan karena pemeriksaan dilakukantampa mempertimbangkan kondisi aktual peralatan sehingga terkadang pemeliharaan dilakukan saat peralatan masih dalam kondisi baik (Jardine et al., 2006).

Predictive maintenance merupakan metode pemeliharaan berbasis kondisi peralatan yang dilakukan dengan memanfaatkan data operasional dan teknologi digital untuk memprediksi potensi kerusakan sebelum gangguan terjadi. Metode ini dinilai lebih efektif karena mampu meningkatkan efisiensi pemeliharaan dan mengurangi downtime sistem tenaga listrik (Samatas et al., 2021).

Tabel 1. Perbandingan Metode Pemeliharaan.

| Jenis Pemeliharaan | Karakteristik | | Kelebihan | Kekurangan |
|---------------------------|----------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------|
| Corrective Maintenance | Dilaksanakan | setelah peralatan mengalami gangguan atau kegagalan fungsi | Sistem sederhana | Downtime tinggi |
| Preventive Maintenance | Dilaksanakan | secara terjadwal dalam interval waktu tertentu | Mengurangi kerusakan mendadak | Kurang efisien |
| Predictive Maintenance | Berdasarkan | kondisi peralatan | Deteksi dini dan efisiensi tinggi | Membutuhkan teknologi digital |

Sumber: Diolah dari Mobley (2002) dan Jardine et al. (2006).

Predictive Maintenance

Predictive maintenance merupakan metode pemeliharaan modern yang memanfaatkan teknologi digital untuk memonitor kondisi peralatan dan memprediksi kemungkinan kegagalan sistem sebelum kerusakan terjadi.

Metode ini menggunakan data operasional yang diperoleh melalui sensor monitoring untuk dianalisis menggunakan algoritma Artificial Intelligence (AI) dan machine learning (Rana, 2025).

Proses *predictive maintenance* dimulai dengan pengambilan data kondisi peralatan secara real-time melalui sensor digital. Data tersebut kemudian dikirim ke sistem pengolahan data untuk dianalisis dan digunakan dalam mendeteksi pola kerusakan. Hasil analisis digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan sehingga proses perbaikan dapat dilakukan sebelum terjadi gangguan sistem (Susto et al., 2015).

Penerapan *predictive maintenance* memberikan berbagai manfaat dalam pengelolaan sistem tenaga listrik, seperti peningkatan efisiensi operasi, pengurangan waktu henti sistem, perpanjangan masa pakai peralatan, serta peningkatan keandalan jaringan. Di samping itu, pendekatan ini dapat membantu mengoptimalkan biaya pemeliharaan karena tindakan perbaikan dan perawatan dilakukan berdasarkan kondisi nyata peralatan yang terpantau secara langsung (Lee et al., 2015).

Teknologi Digital Pendukung

Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi yang memungkinkan berbagai perangkat saling terhubung melalui jaringan internet sehingga proses pertukaran data dapat berlangsung secara otomatis. Dalam sistem tenaga listrik, teknologi ini dimanfaatkan untuk memantau kondisi peralatan menggunakan sensor digital yang mampu mengukur berbagai parameter, seperti suhu, tegangan, arus, getaran, dan kelembapan secara waktu nyata (*real-time*) (Mahmoud et al., 2021).

Artificial Intelligence (AI)

Artificial Intelligence (AI) atau kecerdasan buatan merupakan teknologi yang dimanfaatkan untuk mengolah dan menganalisis data operasional pada sistem tenaga listrik. Melalui kemampuan dalam mengidentifikasi pola-pola tertentu dari data yang telah terkumpul, AI dapat memperkirakan potensi kerusakan peralatan serta mendeteksi indikasi gangguan sejak dini. Dengan demikian, kegiatan pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih tepat, efektif, dan berdasarkan kondisi aktual peralatan (Rana, 2025).

Machine Learning

Machine learning merupakan salah satu bidang dalam kecerdasan buatan yang berfokus pada pemanfaatan data untuk mengenali pola dan karakteristik tertentu, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menghasilkan prediksi berdasarkan informasi yang telah dikumpulkan sebelumnya.

Pada predictive maintenance, machine learning digunakan untuk mendeteksi gejala awal kerusakan peralatan listrik melalui proses analisis data operasional secara otomatis (Susto et al., 2015).

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

SCADA merupakan sistem pengawasan dan pengendalian yang digunakan pada sistem tenaga listrik modern. Sistem ini memungkinkan operator melakukan monitoring kondisi sistem tenaga listrik secara terpusat dan real-time sehingga proses pengendalian sistem dapat dilakukan secara lebih efektif (Suryadarma & Ai, 2020).

Digital Twin

Digital twin adalah model virtual yang dibuat untuk merepresentasikan kondisi dan karakteristik suatu peralatan atau sistem fisik, sehingga memungkinkan proses pemantauan, analisis, dan simulasi operasi dilakukan secara digital. Teknologi ini membantu proses analisis performa sistem serta prediksi kegagalan peralatan secara lebih akurat sebelum gangguan terjadi pada sistem fisik (Zheng et al., 2020).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode *literature review* yang dilakukan melalui proses pengumpulan, penelaahan, dan analisis berbagai publikasi ilmiah yang relevan dengan tema penelitian. Kajian literatur tersebut bertujuan untuk memperoleh informasi, landasan teoritis, serta temuan dari penelitian terdahulu yang membahas penerapan teknologi digital dalam *predictive maintenance* pada sistem tenaga listrik. Pemilihan metode ini didasarkan pada kemampuannya dalam memberikan pemahaman yang menyeluruh mengenai perkembangan dan penerapan *predictive maintenance* sebagai salah satu bentuk transformasi digital di bidang ketenagalistrikan (Snyder, 2019).



Gambar 1. Tahapan Penelitian Literatur mengenai Pemanfaatan Teknologi Digital dalam Predictive Maintenance pada Sistem Tenaga Listrik.

Sumber: Diolah oleh penulis (2026).

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari berbagai karya ilmiah, meliputi jurnal nasional dan internasional, prosiding seminar, artikel penelitian, serta buku akademik yang memiliki keterkaitan dengan topik kajian. Literatur yang ditelaah berfokus pada penerapan predictive maintenance, Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), machine learning, Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), *digital twin*, serta pemanfaatan teknologi tersebut pada sistem tenaga listrik. Sebagian besar referensi yang dianalisis merupakan publikasi periode 2015–2025, sehingga informasi yang diperoleh dapat mencerminkan perkembangan terkini dalam bidang teknologi digital dan implementasinya pada sektor ketenagalistrikan. (Mahmoud et al., 2021).

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui penelusuran berbagai sumber literatur secara online dengan memanfaatkan sejumlah basis data ilmiah, seperti Google Scholar, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, dan MDPI. Proses pencarian referensi menggunakan beberapa kata kunci yang sesuai dengan topik penelitian, di antaranya predictive maintenance, digital transformation, smart grid, IoT in power systems, AI for predictive maintenance, serta power system maintenance. Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan relevansi topik, tahun publikasi, serta kesesuaian dengan tujuan penelitian (Samatas et al., 2021).

Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi topik penelitian, pengumpulan literatur, seleksi referensi, analisis isi penelitian terdahulu, hingga penyusunan hasil kajian. Setelah proses pemilihan referensi selesai, data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif. Tahap ini mencakup pengkajian dan perbandingan hasil-hasil penelitian sebelumnya guna memperoleh pemahaman mengenai implementasi berbagai teknologi digital untuk mendukung *predictive maintenance* pada sistem tenaga listrik. Hasil analisis digunakan untuk mengetahui perkembangan teknologi, manfaat implementasi *predictive maintenance*, serta tantangan yang dihadapi dalam penerapannya (Susto et al., 2015).

Dengan menggunakan metode studi literatur, penelitian ini diharapkan mampu menggambarkan secara lebih jelas perkembangan transformasi digital di bidang pemeliharaan tenaga listrik serta prospek implementasi *predictive maintenance* dalam mendukung keandalan sistem tenaga listrik modern.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Artikel-artikel yang terpilih dan digunakan sebagai sumber data dalam kajian *Literature Review* ini disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 2. Daftar Artikel yang Digunakan dalam Kajian Literatur.

| No | Penulis | Temuan utama |
|----|------------------------------------|---|
| 1. | Harianja, Tarigan, & Anisah (2025) | Predictive maintenance terbukti meningkatkan keandalan sistem distribusi dan mengurangi dampak gangguan pada jaringan listrik. |
| 2 | Suryadarma & Ai (2020) | Sistem SCADA dapat dimanfaatkan sebagai sumber data utama untuk implementasi predictive maintenance berbasis monitoring kondisi. |
| 3 | Rana (2025) | Integrasi AI dan SCADA mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih akurat pada smart grid. |
| 4 | Omowaye et al. (2025) | Algoritma AI mampu mendeteksi potensi kerusakan komponen jaringan listrik sebelum terjadi kegagalan operasi. |
| 5 | Samatas et al. (2021) | Kombinasi AI dan IoT meningkatkan efektivitas pemantauan aset secara real-time. |
| 6 | Mahmoud et al. (2021) | Metode prediksi berbasis data dapat digunakan untuk mengidentifikasi berbagai jenis gangguan pada jaringan distribusi listrik. |
| 7 | Putra, Putra, & Fitri (2022) | Proses transformasi digital perlu didukung oleh sumber daya manusia yang memiliki kemampuan dan pengetahuan yang memadai agar teknologi dapat dimanfaatkan secara efektif sesuai dengan tujuan yang diharapkan. |
| 8 | Muhammad (2024) | Pendekatan pemeliharaan berkelanjutan mampu meningkatkan efisiensi operasional dan umur pakai peralatan pembangkit. |
| 9 | Wiherdiansyah & Aribowo (2024) | Penerapan pemeliharaan preventif pada gardu kubikal memiliki peran penting dalam menjaga dan meningkatkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. |
| 10 | Shobah & Anshory (2024) | Strategi pemeliharaan yang tepat meningkatkan reliabilitas switchboard tegangan rendah. |
| 11 | Widisantoso (2024) | Pemeliharaan prediktif lebih efektif dibandingkan pemeliharaan terjadwal dalam mengurangi risiko kegagalan peralatan. |
| 12 | Dermawan et al. (2025) | Integrasi pendekatan digital dan Life Cycle Cost membantu mengoptimalkan biaya pemeliharaan aset. |
| 13 | Nurhidayanti (2026) | AI dan IoT mendukung monitoring kondisi infrastruktur secara otomatis dan prediksi kinerja aset. |
| 14 | Aprilia (2025) | Integrasi AI dan Digital Twin meningkatkan akurasi analisis kondisi serta perencanaan pemeliharaan infrastruktur. |

Berdasarkan sintesis literatur yang telah dilakukan, teknologi digital yang paling banyak digunakan dalam implementasi predictive maintenance pada sistem tenaga listrik meliputi teknologi Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence* atau AI), serta pembelajaran mesin (*Machine Learning* atau ML), SCADA, dan Digital Twin. Seluruh teknologi tersebut berkontribusi dalam proses pemantauan kondisi peralatan secara real-time, analisis data operasional, prediksi kegagalan peralatan, serta pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih efektif. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan teknologi digital mampu meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik, mengurangi downtime, dan menekan biaya pemeliharaan.

Implementasi *Internet of Things* (IoT) pada *Predictive Maintenance*

Berdasarkan hasil kajian literatur, teknologi *Internet of Things* (IoT) memiliki peran penting dalam mendukung penerapan *predictive maintenance* pada sistem tenaga listrik. Melalui pemanfaatan IoT, kondisi peralatan dapat dipantau secara berkelanjutan dan waktu nyata (*real-time*) dengan bantuan sensor digital yang terintegrasi ke dalam jaringan komunikasi data. Sensor-sensor tersebut berfungsi untuk mengumpulkan berbagai data operasional, seperti suhu, arus, tegangan, tekanan, kelembapan, serta tingkat getaran pada peralatan tenaga listrik, termasuk transformator, generator, motor listrik, dan jaringan distribusi.

Data hasil monitoring dikirim secara otomatis menuju pusat pengolahan data sehingga operator dapat mengetahui kondisi aktual peralatan tanpa melakukan inspeksi manual secara langsung. Mahmoud et al. (2021) menjelaskan bahwa penggunaan sensor pintar pada smart grid mampu meningkatkan kemampuan deteksi dini gangguan sistem distribusi tenaga listrik.

Pemanfaatan *Artificial Intelligence* dan *Machine Learning*

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan *machine learning* memiliki peran yang signifikan dalam mendukung proses analisis data pada sistem *predictive maintenance*. Teknologi ini digunakan untuk mempelajari pola operasi normal peralatan dan mendeteksi penyimpangan yang mengindikasikan potensi kerusakan.

Temuan dari sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan algoritma *machine learning*, seperti *Artificial Neural Network* (ANN), *Support Vector Machine* (SVM), dan *Random Forest*, mampu meningkatkan akurasi dalam proses prediksi gangguan pada transformator dan generator. Rana (2025) menyatakan bahwa integrasi AI pada sistem SCADA mampu mempercepat proses diagnosis kerusakan serta meningkatkan pengambilan keputusan pemeliharaan secara otomatis.

AI juga digunakan untuk menganalisis data historis operasional dalam jumlah besar sehingga sistem mampu mengenali pola gangguan yang sulit dideteksi secara manual. Hasil analisis menunjukkan bahwa predictive maintenance berbasis AI dapat membantu perusahaan listrik mengurangi downtime dan meningkatkan efisiensi biaya operasional. Temuan penelitian ini sejalan dengan penelitian Omowaye et al. (2025) yang menyatakan bahwa penerapan AI pada smart grid meningkatkan kemampuan fault detection dan mempercepat respons terhadap gangguan sistem tenaga listrik.

Integrasi SCADA dalam Sistem *Predictive Maintenance*

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) merupakan sistem yang berfungsi untuk melakukan pengawasan dan pengendalian secara terpusat pada sistem tenaga listrik modern. Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa integrasi SCADA dengan *predictive maintenance* dapat mendukung pemantauan kondisi sistem secara *real-time* serta meningkatkan keterpaduan dalam pengelolaan data operasional. SCADA berfungsi mengumpulkan data operasional dari berbagai perangkat di lapangan seperti gardu induk, transformator, dan jaringan distribusi. Informasi tersebut kemudian ditampilkan pada pusat kendali sehingga operator dapat melakukan pengawasan kondisi sistem secara lebih efektif.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi SCADA membantu meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik karena operator dapat mendeteksi gangguan lebih cepat. Selain itu, penggunaan SCADA juga mengurangi kebutuhan inspeksi manual sehingga efisiensi operasional meningkat.

Penelitian Suryadarma dan Ai (2020) menunjukkan bahwa predictive maintenance berbasis SCADA mampu membantu perusahaan industri dalam mengoptimalkan jadwal pemeliharaan berdasarkan kondisi aktual peralatan. Hal ini menunjukkan adanya keterkaitan antara teori predictive maintenance dengan implementasi sistem monitoring digital berbasis SCADA.

Implementasi *Digital Twin* pada Sistem Tenaga Listrik

Digital twin merupakan model virtual yang merepresentasikan suatu sistem fisik dan digunakan untuk mensimulasikan kondisi operasionalnya secara *real-time*. Berdasarkan hasil kajian, teknologi digital twin banyak digunakan untuk mendukung predictive maintenance pada transformator, generator, dan jaringan distribusi tenaga listrik. Digital twin memungkinkan operator melakukan simulasi kondisi operasi peralatan tanpa menghentikan sistem fisik. Teknologi ini membantu proses analisis performa sistem dan prediksi kegagalan sebelum gangguan benar-benar terjadi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa digital twin mampu meningkatkan akurasi diagnosis gangguan dan membantu proses pengambilan keputusan pemeliharaan. Aprilia (2025) menjelaskan bahwa integrasi digital twin dengan AI dapat meningkatkan efektivitas pemeliharaan infrastruktur berbasis data real-time. Secara teoritis, implementasi digital twin mendukung konsep smart grid karena memungkinkan integrasi antara sistem fisik dan sistem digital dalam satu platform monitoring yang terhubung secara real-time.

Implementasi Predictive Maintenance pada Peralatan Listrik

Penerapan *predictive maintenance* telah dilakukan pada berbagai jenis peralatan dalam sistem tenaga listrik, termasuk transformator, generator, motor listrik, serta jaringan distribusi. Pada transformator daya, predictive maintenance digunakan untuk memonitor suhu minyak, kandungan gas terlarut, dan kondisi isolasi.

Pada generator, sistem predictive maintenance digunakan untuk memonitor getaran rotor, temperatur kumparan, dan kondisi bearing. Data tersebut dianalisis menggunakan AI untuk memprediksi kemungkinan kerusakan mekanik maupun gangguan kelistrikan.

Tabel 3. Implementasi Iot Pada Sistem *Predictive Maintenance*.

| Peralatan | Parameter Monitoring | Teknologi Sensor | Manfaat |
|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| Transformator | Suhu Dan Arus | Sensor Suhu Dan Arus | Deteksi Overheating |
| Generator | Getaran Rotor | Sensor Vibrasi | Deteksi Gangguan Mekanik |
| Motor Listrik | Temperatur | Sensor Temperatur | Prediksi Kerusakan Bearing |
| Jaringan Distribusi | Tegangan Dan Arus | Smart Sensor | Monitoring Gangguan Jaringan |

Sumber: Diolah dari Mahmoud et al. (2021)

Selain itu, predictive maintenance juga diterapkan pada smart grid untuk memantau kondisi jaringan distribusi secara real-time. Implementasi ini membantu meningkatkan kontinuitas penyaluran energi listrik kepada konsumen serta mengurangi risiko pemadaman.

Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan *predictive maintenance* memberikan dampak positif terhadap peningkatan keandalan sistem tenaga listrik serta mendukung perpanjangan umur operasional peralatan melalui deteksi dan penanganan gangguan secara lebih dini.

Keunggulan dan Tantangan Implementasi Predictive Maintenance

Hasil studi literatur menunjukkan bahwa predictive maintenance memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode pemeliharaan konvensional. Keunggulan utama meliputi pengurangan downtime, peningkatan efisiensi biaya operasional, peningkatan keandalan sistem, dan kemampuan deteksi dini gangguan. Namun demikian, implementasi predictive maintenance juga menghadapi berbagai tantangan.

Salah satu kendala utama adalah tingginya biaya investasi awal untuk pengadaan sensor, sistem komunikasi data, perangkat AI, dan infrastruktur digital lainnya. Selain itu, aspek cybersecurity menjadi perhatian penting karena integrasi sistem digital meningkatkan risiko serangan siber pada sistem tenaga listrik. Tantangan lainnya adalah keterbatasan kompetensi sumber daya manusia dalam pengoperasian teknologi AI, IoT, dan analisis data.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa transformasi digital pada sistem pemeliharaan tenaga listrik memerlukan dukungan infrastruktur, keamanan jaringan, dan peningkatan kompetensi SDM agar implementasi predictive maintenance dapat berjalan secara optimal.

Implikasi Penelitian

Secara teoritis, penelitian ini menunjukkan bahwa predictive maintenance merupakan bagian penting dari transformasi digital pada sistem tenaga listrik modern. Integrasi IoT, AI, machine learning, SCADA, dan digital twin terbukti mampu meningkatkan efektivitas pemeliharaan berbasis kondisi peralatan.

Penelitian ini memberikan kontribusi praktis berupa referensi bagi industri ketenagalistrikan dalam menerapkan sistem pemeliharaan berbasis digital yang lebih efektif untuk mendukung keandalan sistem tenaga listrik. Di samping itu, hasil kajian ini dapat digunakan sebagai pijakan dalam pengembangan teknologi *smart grid* dan sistem tenaga listrik yang lebih cerdas.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kajian terhadap berbagai sumber literatur menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi digital dalam kegiatan pemeliharaan berbasis prediksi memberikan dampak positif terhadap kinerja sistem tenaga listrik. Integrasi IoT, AI, *machine learning*, SCADA, dan *digital twin* memungkinkan pemantauan kondisi aset secara berkelanjutan sehingga gangguan dapat diidentifikasi lebih awal, waktu henti operasi dapat diminimalkan, umur pakai peralatan menjadi lebih panjang, dan proses pemeliharaan dapat dilaksanakan dengan lebih efisien. Namun, implementasinya masih menghadapi tantangan berupa tingginya biaya investasi, risiko keamanan siber, dan kebutuhan peningkatan kompetensi sumber daya manusia. Oleh karena itu, sektor ketenagalistrikan perlu terus mengembangkan infrastruktur digital, memperkuat keamanan sistem, serta meningkatkan kapasitas SDM agar penerapan predictive maintenance dapat berjalan secara optimal. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metode yang lebih sistematis seperti Systematic Literature Review (SLR) atau studi kasus lapangan untuk memperoleh hasil yang lebih mendalam dan komprehensif.

DAFTAR REFERENSI

- Aghazadeh Ardebili, Ali, et al. "Digital Twins of smart energy systems: a systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges." *Energy Informatics* 7.1 (2024): 94.
- Aghazadeh Ardebili, Ali, et al. "Digital Twins of smart energy systems: a systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges." *Energy Informatics* 7.1 (2024): 94.
- Aprilia, E. (2025). INTEGRASI ARTIFICIAL INTELLIGENCE DAN DIGITAL TWIN UNTUK PEMELIHARAAN INFRASTRUKTUR DI INDONESIA. *Journal of Technique*, 1(1), 21-33.
- Dermawan, H., Rowlend, J., Cofely, C., & Palamba, W. (2025). Optimalisasi Anggaran Pemeliharaan Gedung Publik Berbasis Life Cycle Cost (Lcc) Terintegrasi Konvensional-Digital. *Konferensi Nasional Teknik Sipil*, 3(6), 986-993.
- Harianja, R., Tarigan, A. S. P., & Anisah, S. (2025). Pengaruh Pemeliharaan Predictive Maintenance Terhadap Kinerja Sistem Distribusi di Wilayah Rawan Gangguan. *Jurnal Indragiri Penelitian Multidisiplin*, 5(2), 54-62.
- Heluany, Jessica B., and Vasileios Gkioulos. "A review on digital twins for power generation and distribution." *International journal of information security* 23.2 (2024): 1171-1195.
- Mahmoud, M. A., Md Nasir, N. R., Gurunathan, M., Raj, P., & Mostafa, S. A. (2021). The current state of the art in research on predictive maintenance in smart grid distribution network: Fault's types, causes, and prediction methods—A systematic review. *Energies*, 14(16), 5078.
- Muhammad, A. (2024). *MODEL PEMELIHARAAN BERKELANJUTAN PADA SISTEM PEMELIHARAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU SIDRAP= SUSTAINABLE MAINTENANCE MODEL IN SIDRAP WIND POWER PLANT MAINTENANCE SYSTEM* (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Nurhidayanti, M. (2026). Pemanfaatan Kecerdasan Buatan untuk Optimasi Sistem Monitoring dan Prediksi Kinerja Infrastruktur Berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Teknik dan Sains*, 1(1), 29-35.
- Nuruzzaman, Md, et al. "Predictive maintenance in power transformers: A systematic review of AI and IoT applications." *ASRC Procedia: Global Perspectives in Science and Scholarship* 1.01 (2025): 34-47.
- Nuruzzaman, Md, et al. "Predictive maintenance in power transformers: A systematic review of AI and IoT applications." *ASRC Procedia: Global Perspectives in Science and Scholarship* 1.01 (2025): 34-47.
- Omowaye, O. J., Adejumobi, B. S., Onibonoje, M. O., Oladipo, O. E., Ogunlade, M. A., & Ibitoye, O. T. (2025). An AI-Based Predictive Maintenance Technique for Smart Grid Components. *NIPES JSTR SPECIAL ISSUE*, 7(2), 3218-3222.
- Putra, R. A., Putra, R. B., & Fitri, H. (2022). Pengembangan Sumber Daya Manusia Dalam Transformasi Digital di Era Industri 4.0. *Jurnal Pengabdian Masyarakat...[Preprint]*. Available at: <http://journal.lembagakita.org/index.php/jpmn/article/view/661>.
- Rana, S. (2025). A Conceptual Model Development for Evaluating AI-Driven Predictive Maintenance in SCADA-Integrated Smart Grid Systems. *American Journal of Data Science and Analytics*, 6(10), 01-31.

- Rana, Sohel. "A Conceptual Model Development for Evaluating AI-Driven Predictive Maintenance in SCADA-Integrated Smart Grid Systems." *American Journal of Data Science and Analytics* 6.10 (2025): 01-31.
- Rojas, Jezzy James Huaman, et al. "Predictive Operations and Maintenance in Photovoltaic Systems: A Systematic Review and Technique-Scale Taxonomy for Energy Management." *Journal of Robotics and Control (JRC)* 6.5 (2025): 2457-2470.
- Samatas, G. G., Moumgiakmas, S. S., & Papakostas, G. A. (2021, May). Predictive maintenance-bridging artificial intelligence and IoT. In *2021 IEEE World AI IoT Congress (AIoT)* (pp. 0413-0419). IEEE.
- Shobah, M. N., & Anshory, I. (2024). Pioneering Maintenance Strategies for Enhanced Reliability of Low Voltage Switchboards: Merintis Strategi Pemeliharaan untuk Meningkatkan Keandalan Switchboard Tegangan Rendah. *Procedia of Engineering and Life Science*, 5, 644-650.
- Suryadarma, E. H. E., & Ai, T. J. (2020). Predictive maintenance in SCADA-based industries: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2(1), 57-70.
- Widiantoso, H. (2024). Studi Komparatif Antara Pemeliharaan Terjadwal dan Pemeliharaan Prediktif pada Kapal Perang. *Journal of Knowledge and Collaboration*, 1(4), 146-152.
- Wihardiansyah, F., & Aribowo, D. (2024). Analisis Pemeliharaan Preventif Gardu Kubikal untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Distribusi Listrik di PT. Haleyora Powerindo. *Jurnal Surya Teknik*, 11(2), 511-516.