



Analisis Bibliometrik Tren Penelitian Digital Twin untuk Predictive Maintenance pada Sistem Fotovoltaik

Yuhani¹⁾, Ibnu Sina Al Farisi²⁾, Albin Putra Surbakti³⁾, Rika Romatona⁴⁾,
Andi Ramadhan⁵⁾, Arya Sena⁶⁾

^{1, 4)} Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar Medan, Indonesia

^{2, 3, 5, 6)} Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar Medan, Indonesia

1) haniyuhani775@gmail.com, ²⁾ibnusina307@gmail.com, ³⁾albinsurbakti@gmail.com

2)

ARTICLE HISTORY

Received:

April 26, 2026

Revised

May 29, 2026

Accepted:

May 29, 2026

Online available:

June 10, 2026

Keyword:

Bibliometric Analysis, Bifacial Photovoltaic, Digital Twin, Photovoltaic Systems, Predictive Maintenance, Renewable Energy,

*Correspondence:

Name: Yuhani

E-mail:

haniyuhani775@gmail.com

Kantor Editorial

Politeknik Negeri Ambon

Pusat Penelitian dan Pengabdian

Masyarakat

Jalan Ir. M. Putuhena, Wailela-

Rumahtiga, Ambon Maluku,

Indonesia

Kode Pos: 97234

ABSTRACT

The rapid development of renewable energy systems has accelerated research on the integration of digital technologies in photovoltaic (PV) systems, particularly in predictive maintenance and intelligent monitoring. This study aims to analyze the research trends, thematic structure, and future research opportunities related to digital twin applications in predictive maintenance for photovoltaic systems using a bibliometric approach. Data were collected from the Scopus database using the query: (“digital twin” AND (“predictive maintenance” OR “fault detection” OR “condition monitoring”) AND (“photovoltaic” OR “solar energy” OR “PV system” OR “bifacial photovoltaic” OR “bifacial PV”)). The study analyzed 60 selected documents published between 2020 and 2026 using the PRISMA approach and VOSviewer visualization. The results indicate a significant increase in scientific publications after 2023, from 1 publication in 2020, 2 in 2021, 2 in 2022, and 4 in 2023, to 13 publications in 2024 and a peak of 32 publications in 2025. The network visualization analysis revealed that the dominant research topics were digital twin, photovoltaic systems, predictive maintenance, fault detection, machine learning, artificial intelligence, and renewable energy. Overlay visualization further showed a research shift from conventional fault diagnosis toward intelligent real-time monitoring systems based on AI, IoT, and predictive analytics. In addition, the bibliometric mapping demonstrated that bifacial photovoltaic technology has not yet emerged as a dominant research cluster or keyword in the existing literature network. This finding indicates that the integration of digital twin and predictive maintenance into bifacial photovoltaic systems remains underexplored and represents a promising future research direction. This study contributes to identifying the evolution of research trends and the emerging opportunities for developing intelligent and sustainable photovoltaic systems based on digital twin technology.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan energi terbarukan menjadi fokus utama dalam transisi energi global untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan menekan emisi gas rumah kaca. Salah satu sektor yang mengalami pertumbuhan paling signifikan adalah energi surya melalui teknologi photovoltaic (PV). Berdasarkan laporan International Energy Agency (IEA), kapasitas terpasang PV global telah melampaui 1,6 TW pada tahun 2024 dan menjadi kontributor terbesar dalam penambahan kapasitas listrik terbarukan dunia. Pertumbuhan ini didorong oleh meningkatnya

kebutuhan energi bersih, penurunan biaya teknologi panel surya, serta dukungan kebijakan energi berkelanjutan di berbagai negara.

Di Indonesia, pemanfaatan energi surya juga menunjukkan tren peningkatan seiring dengan target bauran energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025. Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baik dalam skala utilitas maupun rooftop PV, terus mengalami peningkatan dalam beberapa tahun terakhir. Seiring dengan perkembangan tersebut, inovasi teknologi panel surya juga berkembang menuju sistem yang lebih efisien, salah satunya adalah



photovoltaic bifacial. Teknologi bifacial mampu menyerap radiasi matahari dari kedua sisi panel sehingga memiliki potensi peningkatan efisiensi energi dibandingkan panel surya konvensional. Selain memberikan output energi yang lebih tinggi, sistem bifacial juga dinilai lebih adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan dan instalasi (Murillo-Calderon, 2026).

Namun demikian, peningkatan jumlah instalasi sistem PV, khususnya pada teknologi bifacial, menimbulkan tantangan baru dalam aspek operasional dan pemeliharaan. Faktor seperti degradasi modul, akumulasi debu, hotspot, perubahan temperatur, serta fluktuasi irradiansi dapat menyebabkan penurunan performa sistem secara signifikan (Siregar, Febryan and Budiani, 2025; Reddy *et al.*, 2026; Sifat *et al.*, 2026). Kompleksitas pada sistem bifacial juga meningkat karena adanya pengaruh rear-side irradiance dan variasi kondisi lingkungan yang memengaruhi performa kedua sisi panel. Pendekatan pemeliharaan konvensional yang bersifat reaktif dinilai kurang efektif karena tidak mampu mendeteksi potensi kegagalan secara dini dan cenderung meningkatkan biaya operasional serta downtime sistem (Mudiantoro, 2024).

Seiring dengan perkembangan teknologi Industry 4.0, konsep digital twin (DT) mulai banyak diterapkan dalam berbagai sektor industri dan energi modern. Digital twin merupakan representasi virtual dari sistem fisik yang terintegrasi dengan data real-time untuk mendukung pemantauan kondisi, simulasi performa, analisis prediktif, serta optimasi sistem secara berkelanjutan (Kut and Pietrucha-Urbanik, 2022; Domenteanu *et al.*, 2024). Dalam konteks sistem photovoltaic, penerapan digital twin memungkinkan proses monitoring dan fault detection dilakukan secara lebih akurat melalui integrasi sensor, Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), dan machine learning. Selain itu, integrasi digital twin dengan pendekatan predictive maintenance memungkinkan identifikasi potensi kegagalan berdasarkan data historis dan kondisi operasional aktual sehingga dapat meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi downtime, serta memperpanjang umur sistem photovoltaic (Olayiwola, Cali and Elsdon, 2025).

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas penerapan digital twin pada sistem energi dan photovoltaic, khususnya untuk monitoring performa, fault detection, condition monitoring, dan predictive maintenance. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa integrasi AI dan IoT berperan penting dalam meningkatkan akurasi diagnosis gangguan dan optimasi performa sistem PV. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem photovoltaic konvensional dan studi teknis individual. Kajian yang secara khusus memetakan perkembangan

penelitian digital twin dalam predictive maintenance sistem photovoltaic menggunakan pendekatan bibliometrik masih relatif terbatas (Basim *et al.*, 2024). (Siregar, 2020; Shahverdian *et al.*, 2026).

Selain itu, penelitian terkait penerapan digital twin pada photovoltaic bifacial juga belum banyak dieksplorasi, padahal sistem ini memiliki karakteristik operasional yang lebih kompleks dibandingkan PV konvensional. Kompleksitas tersebut membutuhkan pendekatan monitoring dan pemeliharaan yang lebih adaptif berbasis data real-time. Keterbatasan penelitian ini menunjukkan adanya research gap, khususnya dalam memahami tren perkembangan penelitian, struktur topik, serta peluang pengembangan digital twin untuk predictive maintenance pada sistem photovoltaic, termasuk potensi implementasinya pada teknologi bifacial PV (Chen *et al.*, 2026; Pavlyuk and Alomar, 2026).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren penelitian terkait digital twin dalam predictive maintenance pada sistem photovoltaic menggunakan pendekatan bibliometrik. Analisis dilakukan menggunakan data publikasi dari database Scopus dan divisualisasikan melalui perangkat lunak VOSviewer untuk mengidentifikasi perkembangan publikasi, hubungan antar topik penelitian, kluster kata kunci, serta arah perkembangan penelitian di masa depan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan riset digital twin pada sistem photovoltaic sekaligus mengidentifikasi peluang pengembangan penelitian lebih lanjut, khususnya terkait implementasi teknologi tersebut pada sistem photovoltaic bifacial. (Abedi-Varaki and Račiukaitis, 2026; Chuyen and Rajagopal, 2026).

2. TINJAUAN PUSTAKA

a. Digital Twin pada Sistem Photovoltaic

Perkembangan teknologi Industry 4.0 mendorong integrasi sistem digital dalam berbagai sektor industri, termasuk sektor energi terbarukan. Salah satu teknologi yang berkembang pesat adalah digital twin (DT), yaitu representasi virtual dari sistem fisik yang terhubung dengan data real-time untuk mendukung monitoring, simulasi, analisis prediktif, dan optimasi sistem. Teknologi ini memungkinkan sinkronisasi antara objek fisik dan model virtual sehingga kondisi operasional sistem dapat dipantau secara berkelanjutan dan akurat (Siregar *et al.*, 2025).

Dalam sektor energi, digital twin telah diterapkan pada smart grid, microgrid, sistem manufaktur energi, serta photovoltaic (PV). Basim *et al.* (2024) menjelaskan bahwa penerapan digital twin pada sektor energi mampu meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi downtime, dan mendukung pengambilan



keputusan berbasis data. Pada sistem photovoltaic, digital twin digunakan untuk memantau performa panel surya, mendeteksi anomali sistem, memprediksi degradasi modul, dan mengoptimalkan efisiensi konversi energi (Zohri *et al.*, 2024).

Selain itu, integrasi digital twin dengan teknologi sensor, cloud computing, Internet of Things (IoT), dan artificial intelligence (AI) memungkinkan proses monitoring dilakukan secara real-time. Sistem ini mendukung pengumpulan data operasional secara kontinu sehingga potensi gangguan dapat diidentifikasi lebih awal sebelum terjadi kegagalan sistem. Dengan demikian, penerapan digital twin dinilai mampu meningkatkan reliabilitas dan efisiensi operasional sistem photovoltaic secara signifikan.

Seiring meningkatnya kompleksitas sistem photovoltaic modern, khususnya pada teknologi bifacial PV, kebutuhan terhadap pendekatan monitoring dan pemeliharaan berbasis data juga semakin penting. Sistem bifacial memiliki karakteristik operasional yang lebih kompleks dibandingkan PV konvensional karena mampu menyerap radiasi matahari dari kedua sisi panel. Kondisi ini menyebabkan performa sistem sangat dipengaruhi oleh rear-side irradiance, orientasi modul, temperatur, serta kondisi lingkungan sekitar. Oleh karena itu, teknologi digital twin menjadi salah satu pendekatan yang potensial untuk mendukung pengelolaan sistem photovoltaic bifacial secara lebih adaptif dan efisien (Arifin *et al.*, 2026).

b. Predictive Maintenance dan Integrasi AI-IoT

Predictive maintenance merupakan pendekatan pemeliharaan berbasis prediksi kondisi sistem dengan memanfaatkan data operasional dan historis untuk mengidentifikasi potensi kegagalan sebelum kerusakan terjadi. Berbeda dengan corrective maintenance yang bersifat reaktif, predictive maintenance memungkinkan proses pemeliharaan dilakukan secara lebih efektif sehingga dapat mengurangi downtime dan biaya operasional.

Dalam sistem photovoltaic, predictive maintenance menjadi semakin penting karena performa panel surya sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal seperti temperatur, debu, shading, kelembapan, dan degradasi material. Gangguan pada sistem photovoltaic dapat menyebabkan penurunan efisiensi energi secara signifikan apabila tidak dideteksi sejak dini. Oleh karena itu, berbagai penelitian mulai mengembangkan sistem fault detection dan condition monitoring berbasis data untuk meningkatkan keandalan sistem PV.

Perkembangan artificial intelligence (AI) dan Internet of Things (IoT) turut mempercepat implementasi predictive maintenance pada sistem

photovoltaic. Teknologi IoT memungkinkan pengumpulan data real-time melalui sensor yang terhubung secara kontinu, sedangkan AI dan machine learning digunakan untuk menganalisis pola operasional sistem dan mendeteksi anomali secara otomatis. Integrasi teknologi tersebut memungkinkan proses monitoring dilakukan secara lebih cepat dan akurat dibandingkan pendekatan konvensional.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi digital twin, AI, dan IoT mampu meningkatkan efektivitas predictive maintenance pada sistem energi modern. Pendekatan ini tidak hanya digunakan untuk mendeteksi kerusakan, tetapi juga mendukung simulasi performa sistem, optimasi energi, dan pengambilan keputusan berbasis data. Dengan demikian, integrasi digital twin dan predictive maintenance menjadi salah satu arah perkembangan utama dalam pengelolaan sistem photovoltaic berbasis teknologi digital.

c. Penelitian Terdahulu dan Research Gap

Penelitian terkait digital twin dan predictive maintenance pada sistem photovoltaic mengalami perkembangan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai studi telah mengkaji penerapan teknologi digital untuk monitoring performa sistem, fault detection, optimasi energi, dan integrasi AI dalam sistem photovoltaic. Selain itu, perkembangan teknologi bifacial PV juga mulai menarik perhatian karena potensinya dalam meningkatkan efisiensi konversi energi dibandingkan panel surya konvensional.

Tabel 1 menunjukkan beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan topik digital twin, predictive maintenance, dan sistem photovoltaic.

peneliti	Fokus Penelitian	Metode	Temuan utama	keterbatasan
Basim et al. (2024)	Digital twin pada sektor energi	Literature review	DT meningkatkan monitoring dan optimasi energi	Tidak spesifik pada PV bifacial
Olayiwola et al. (2025)	Digital twin untuk solar PV management	Frame work analysis	DT efektif untuk monitoring real-time sistem PV	Belum membahas bibliometrik



Tarigan (2025)	Deteksi dini kerusakan PV	Monitoring berbasis data	Fault detection meningkatkan reliabilitas sistem	Fokus pada PV konvensional
Shahverdian et al. (2026)	Optimasi bifacial PV	Hybrid optimization	Bifacial PV meningkatkan efisiensi energi	Tidak mengintegrasikan DT
Sifat et al. (2026)	DT pada microgrid dan energy management	Systematic review	Integrasi AI dan IoT semakin dominan	Tidak fokus pada predictive maintenance PV
Kut & Pietruk Urbani (2022)	Failure analysis pada PV	Bibliometric analysis	Fault dan degradasi menjadi topik dominan	Tidak membahas DT

Berdasarkan penelitian terdahulu pada Tabel 1, terlihat bahwa penelitian terkait digital twin pada sistem photovoltaic berkembang menuju integrasi teknologi digital, artificial intelligence, dan Internet of Things dalam pengelolaan energi modern. Sebagian besar penelitian berfokus pada monitoring performa, fault detection, optimasi energi, dan pengembangan sistem berbasis data real-time.

Selain itu, penelitian mengenai photovoltaic bifacial umumnya masih berfokus pada peningkatan efisiensi energi, optimasi desain sistem, dan analisis performa teknis. Penelitian yang mengintegrasikan digital twin dengan predictive maintenance pada sistem bifacial PV masih relatif terbatas. Di sisi lain, studi bibliometrik terkait sistem photovoltaic juga masih didominasi oleh analisis umum mengenai renewable energy, fault detection, atau photovoltaic systems tanpa secara khusus membahas perkembangan digital twin dalam predictive maintenance sistem PV. Kondisi tersebut menunjukkan adanya research gap dalam pemetaan perkembangan penelitian digital twin untuk predictive maintenance pada sistem photovoltaic. Hingga saat ini, belum banyak penelitian yang secara khusus menganalisis tren publikasi, hubungan antar topik penelitian, serta arah perkembangan riset digital twin pada sistem photovoltaic menggunakan

pendekatan bibliometrik. Selain itu, peluang implementasi teknologi digital twin pada sistem bifacial PV juga masih belum banyak dibahas dalam literatur ilmiah.

d. Posisi dan Kontribusi Penelitian

Berdasarkan telaah literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penelitian terkait digital twin pada sistem photovoltaic masih berkembang dan didominasi oleh studi teknis individual. Meskipun teknologi digital twin, AI, dan IoT telah banyak diterapkan dalam monitoring dan optimasi sistem energi, kajian bibliometrik yang secara khusus memetakan perkembangan penelitian digital twin dalam predictive maintenance sistem photovoltaic masih relatif terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kontribusi dalam:

1. memetakan perkembangan publikasi penelitian digital twin pada sistem photovoltaic;
2. mengidentifikasi kluster dan hubungan antar topik penelitian menggunakan analisis co-occurrence;
3. menganalisis tren perkembangan penelitian berdasarkan overlay visualization;
4. mengidentifikasi peluang penelitian lanjutan terkait implementasi digital twin pada sistem photovoltaic bifacial.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai arah perkembangan riset digital twin dalam predictive maintenance sistem photovoltaic sekaligus menjadi dasar pengembangan penelitian lanjutan pada sistem energi terbarukan berbasis teknologi digital.

3. METODOLOGI

a. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan bibliometrik kuantitatif untuk menganalisis perkembangan penelitian terkait penerapan digital twin dalam predictive maintenance pada sistem photovoltaic. Pendekatan bibliometrik digunakan karena mampu memetakan struktur pengetahuan, tren publikasi, hubungan antar topik penelitian, serta perkembangan literatur ilmiah secara sistematis dan objektif berdasarkan metadata publikasi.

Metode bibliometrik banyak digunakan dalam penelitian ilmiah untuk mengidentifikasi perkembangan bidang penelitian tertentu melalui analisis publikasi, sitasi, dan hubungan antar kata kunci. Dalam penelitian ini, analisis difokuskan pada perkembangan topik digital twin, predictive maintenance, dan photovoltaic systems menggunakan



teknik visualisasi jaringan berbasis perangkat lunak VOSviewer (Zabala *et al.*, 2026)

b. Sumber dan Strategi Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh dari database Scopus karena memiliki cakupan publikasi internasional yang luas dan metadata yang terstruktur sehingga banyak digunakan dalam penelitian bibliometrik. Pengumpulan data dilakukan pada Mei 2026 menggunakan fitur Title-Abstract-Keywords.

Query pencarian yang digunakan adalah:

TITLE-ABS-KEY (“digital twin” AND (“predictive maintenance” OR “fault detection” OR “condition monitoring”) AND (“photovoltaic” OR “solar energy” OR “PV system” OR “bifacial photovoltaic” OR “bifacial PV”))

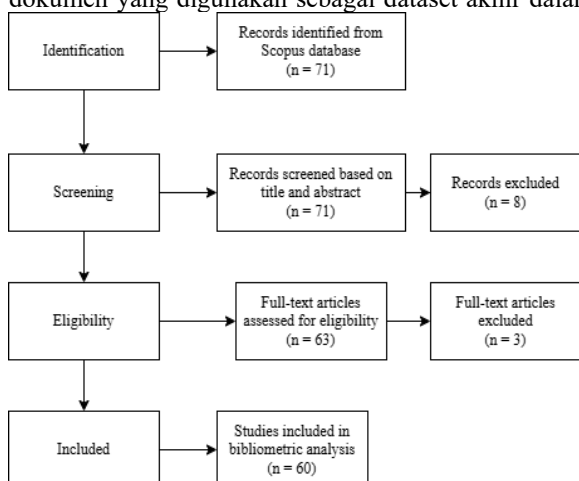
Kriteria inklusi meliputi: (1) dokumen berbahasa Inggris, (2) jenis dokumen article, review, dan conference paper, (3) terindeks Scopus, serta (4) periode publikasi 2020–2026. Berdasarkan hasil pencarian awal diperoleh sebanyak 71 dokumen.

c. Proses Seleksi Literatur Menggunakan PRISMA

Seleksi literatur dilakukan menggunakan pendekatan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) untuk memastikan proses penyaringan data dilakukan secara sistematis dan transparan.

Pada tahap identification, diperoleh 71 dokumen dari database Scopus. Tahap screening dilakukan melalui pemeriksaan judul, abstrak, dan kata kunci sehingga sebanyak 8 dokumen dieliminasi karena tidak relevan dengan topik penelitian. Selanjutnya, tahap eligibility dilakukan melalui peninjauan isi dokumen secara lebih mendalam dan sebanyak 3 dokumen kembali dieliminasi.

Berdasarkan proses tersebut, diperoleh 60 dokumen yang digunakan sebagai dataset akhir dalam



analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer. Proses seleksi literatur ditunjukkan pada diagram PRISMA pada Gambar 1.

d. Analisis Bibliometrik Menggunakan VOSviewer

Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer versi terbaru untuk memvisualisasikan hubungan antar data publikasi dalam bentuk jaringan penelitian. Data hasil pencarian dari Scopus diekspor dalam format CSV dan diproses menggunakan VOSviewer.

Analisis yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. co-occurrence analysis;
2. network visualization;
3. overlay visualization.

Co-occurrence analysis digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antar kata kunci berdasarkan frekuensi kemunculan bersama dalam dokumen penelitian. Unit analisis yang digunakan adalah author keywords karena dianggap mampu merepresentasikan fokus utama penelitian secara lebih spesifik.

Dalam proses analisis, ditetapkan threshold minimum occurrence untuk menyaring kata kunci yang memiliki tingkat kemunculan rendah sehingga visualisasi jaringan menjadi lebih representatif dan mudah dianalisis. Ukuran node pada visualisasi menunjukkan frekuensi kemunculan kata kunci, sedangkan garis penghubung menunjukkan tingkat keterkaitan antar topik penelitian.

Network visualization digunakan untuk mengidentifikasi struktur jaringan dan kluster penelitian, sedangkan overlay visualization digunakan untuk menganalisis perkembangan topik penelitian berdasarkan rata-rata tahun publikasi. Melalui pendekatan ini, perkembangan tren penelitian digital twin pada sistem photovoltaic dapat dianalisis secara lebih sistematis.

e. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari identifikasi topik penelitian, penyusunan query pencarian, pengumpulan data dari database Scopus, seleksi dokumen menggunakan pendekatan PRISMA, hingga analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer.

Secara umum, tahapan penelitian terdiri atas:

1. Identifikasi Topik Dan Penentuan Kata Kunci Penelitian;
2. Pengumpulan Data Publikasi Dari Database Scopus;
3. Penyaringan Dan Seleksi Dokumen Menggunakan Prisma;



4. Ekspor Metadata Publikasi Dalam Format Csv;
5. Analisis Bibliometrik Menggunakan Vosviewer;
6. Interpretasi Hasil Visualisasi Jaringan Dan Tren Penelitian;
7. Penyusunan Kesimpulan Dan Identifikasi Peluang Penelitian Lanjutan.

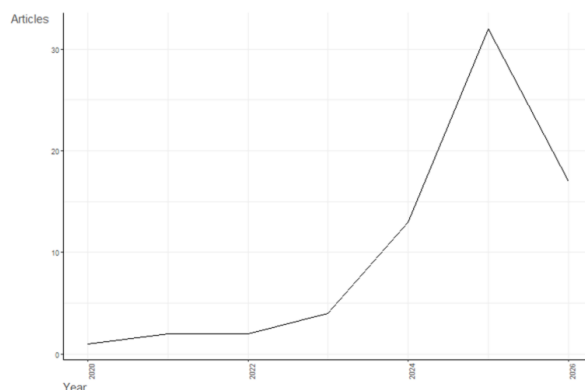
Metodologi ini dirancang untuk menghasilkan analisis yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi dalam penelitian bibliometrik terkait digital twin pada sistem photovoltaic.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Annual Scientific Production

Perkembangan publikasi ilmiah terkait digital twin dalam predictive maintenance pada sistem photovoltaic menunjukkan tren peningkatan yang signifikan selama periode 2020–2026. Berdasarkan hasil pencarian dan seleksi data dari database Scopus, diperoleh total 71 dokumen yang dianalisis berdasarkan distribusi publikasi tahunan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Tahun	Jumlah artikel
2020	1
2021	2
2022	2
2023	4
2024	13
2025	72
2026	17



Gambar 2. Annual Scientific Production Tahun 2020–2026

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 2, jumlah publikasi pada periode 2020–2022 masih relatif rendah dan stabil dengan rata-rata kurang dari tiga artikel per tahun. Kondisi ini menunjukkan bahwa penelitian terkait digital twin pada sistem photovoltaic masih berada pada tahap awal pengembangan dan belum menjadi fokus utama dalam penelitian energi terbarukan.

Peningkatan publikasi mulai terlihat pada tahun 2023 dengan jumlah empat artikel, kemudian

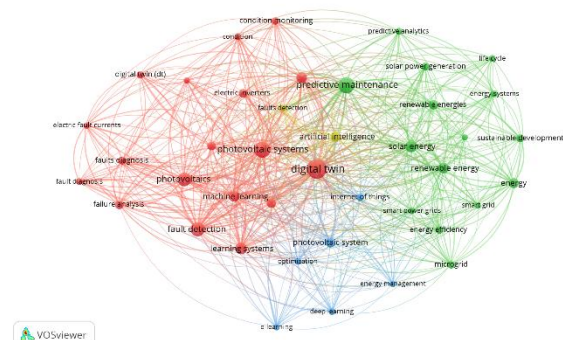
meningkat secara signifikan pada tahun 2024 menjadi 13 artikel. Tren ini menunjukkan meningkatnya perhatian peneliti terhadap integrasi teknologi digital dalam pengelolaan sistem photovoltaic, khususnya terkait monitoring performa, fault detection, dan predictive maintenance berbasis data.

Puncak publikasi terjadi pada tahun 2025 dengan total 32 artikel atau sekitar 45% dari keseluruhan dataset penelitian. Lonjakan ini mengindikasikan bahwa digital twin mulai berkembang sebagai salah satu topik utama dalam penelitian sistem energi modern. Perkembangan tersebut didukung oleh meningkatnya pemanfaatan artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), machine learning, dan real-time monitoring dalam sistem photovoltaic.

Pada tahun 2026 jumlah publikasi menurun menjadi 17 artikel. Namun demikian, penurunan ini belum dapat diinterpretasikan sebagai penurunan minat penelitian karena data tahun 2026 masih bersifat parsial pada saat proses pengumpulan data dilakukan. Secara keseluruhan, tren annual scientific production menunjukkan bahwa penelitian digital twin pada sistem photovoltaic mengalami perkembangan yang sangat pesat setelah tahun 2023 dan memiliki potensi besar untuk terus berkembang pada bidang energi terbarukan berbasis teknologi digital.

b. Network Visualization

Analisis network visualization dilakukan menggunakan metode co-occurrence pada VOSviewer untuk mengidentifikasi hubungan antar kata kunci dalam penelitian terkait digital twin pada sistem photovoltaic. Visualisasi jaringan ini menunjukkan struktur keterkaitan topik penelitian berdasarkan frekuensi kemunculan bersama (co-occurrence) antar kata kunci dalam dataset publikasi.



Gambar 3. Network Visualization Kata Kunci Menggunakan VOSviewer

Berdasarkan hasil visualisasi pada Gambar 3, terlihat bahwa jaringan penelitian membentuk beberapa kluster utama yang saling terhubung. Ukuran node menunjukkan tingkat frekuensi kemunculan kata kunci,



kondisi lingkungan, dan variasi performa dua sisi panel.

Selain itu, hasil overlay visualization menunjukkan bahwa penelitian terbaru mulai mengarah pada isu sustainable development, predictive analytics, energy systems, dan life cycle assessment. Kondisi ini mengindikasikan bahwa arah perkembangan penelitian tidak lagi hanya berfokus pada efisiensi teknis sistem photovoltaic, tetapi juga pada keberlanjutan, efisiensi energi, dan pengelolaan sistem cerdas berbasis data real-time.

Namun demikian, integrasi antara digital twin, predictive maintenance, AI, IoT, dan teknologi bifacial photovoltaic masih belum banyak dibahas secara komprehensif dalam literatur ilmiah. Sebagian besar penelitian masih bersifat parsial dan hanya berfokus pada salah satu aspek teknologi tertentu. Keterbatasan ini menunjukkan adanya peluang penelitian yang besar dalam pengembangan framework digital twin yang lebih adaptif untuk sistem photovoltaic bifacial berbasis monitoring real-time dan predictive analytics.

Dengan demikian, penelitian selanjutnya berpotensi diarahkan pada:

1. pengembangan digital twin khusus untuk sistem bifacial photovoltaic;
2. integrasi AI dan IoT dalam predictive maintenance berbasis real-time;
3. pemanfaatan deep learning untuk prediksi degradasi dan kegagalan sistem bifacial PV;
4. pengembangan smart energy management berbasis digital twin;
5. integrasi sustainability assessment dan life cycle analysis dalam sistem photovoltaic cerdas.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa digital twin telah berkembang menjadi salah satu pendekatan penting dalam pengelolaan sistem photovoltaic modern. Namun, masih terdapat ruang penelitian yang luas, khususnya terkait implementasi teknologi tersebut pada sistem bifacial photovoltaic yang hingga saat ini masih relatif minim dikaji dalam penelitian bibliometrik maupun implementasi teknis.

5. PENUTUP

Penutup terdiri dari Kesimpulan dan Saran.

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil memetakan perkembangan riset terkait digital twin dalam predictive maintenance pada sistem photovoltaic menggunakan pendekatan bibliometrik berbasis Scopus dan VOSviewer. Hasil analisis menunjukkan bahwa jumlah publikasi mengalami peningkatan signifikan setelah tahun 2023 dan mencapai puncak pada tahun 2025, yang menandakan meningkatnya perhatian terhadap

integrasi teknologi digital dalam sistem energi terbarukan.

Analisis network visualization menunjukkan bahwa topik penelitian didominasi oleh digital twin, predictive maintenance, fault detection, machine learning, dan artificial intelligence. Sementara itu, overlay visualization memperlihatkan adanya pergeseran penelitian dari deteksi gangguan konvensional menuju sistem monitoring cerdas berbasis AI, IoT, dan predictive analytics.

Selain itu, hasil bibliometrik menunjukkan bahwa topik bifacial photovoltaic belum muncul sebagai kluster penelitian utama. Kondisi ini mengindikasikan bahwa integrasi digital twin pada sistem bifacial photovoltaic masih memiliki peluang penelitian yang besar, khususnya untuk pengembangan monitoring real-time dan predictive maintenance berbasis data.

5.2 saran

Penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pengembangan framework digital twin yang lebih spesifik untuk sistem bifacial photovoltaic dengan integrasi AI, IoT, dan predictive analytics. Selain itu, diperlukan validasi berbasis data real-time dan implementasi eksperimental agar teknologi digital twin dapat diterapkan secara lebih optimal dalam meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan sistem energi surya modern.

DAFTAR PUSTAKA

Abedi-Varaki, M. and Račiukaitis, G. (2026) "AI-Assisted Bibliometric Analysis of LWFA Research: Trends and Future Directions," *Applied Sciences (Switzerland)*, 16(5). Available at: <https://doi.org/10.3390/app16052335>.

Arifin, Z. *et al.* (2026) "Reinventing solar mobility: A meta-analysis and innovation synthesis of PCM-based PV cooling for EV charging deployment," *Green Technologies and Sustainability*, 4(2). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.grets.2026.100343>.

Basim, F. *et al.* (2024) "A comprehensive review of the dynamic applications of the digital twin technology across diverse energy sectors," *Energy Strategy Reviews*, 52(January), p. 101334. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101334>.

Chen, D. *et al.* (2026) "AutoPV: An intelligent framework for automated design of photovoltaic forecasting models," *Applied Energy*, 415. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.127851>.

Chuyen, T.T. and Rajagopal, P. (2026) "An overview of logistics network through bibliometric analysis using VOSviewer," *Engineering and Applied Science*



- Research*, 53(1), pp. 47–60. Available at: <https://doi.org/10.64960/easr.2026.261451>.
- Domenteanu, A. *et al.* (2024) “United in Green: A Bibliometric Exploration of Renewable Energy Communities,” *Electronics (Switzerland)*, 13(16). Available at: <https://doi.org/10.3390/electronics13163312>.
- Garcés-Gómez, Y.A. *et al.* (2021) “Social impact of renewable energy systems: Solar energy system in vulnerable community case study,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(5), pp. 2337–2344. Available at: <https://doi.org/10.11591/eei.v10i5.3149>.
- Kut, P. and Pietrucha-Urbanik, K. (2022) “Most Searched Topics in the Scientific Literature on Failures in Photovoltaic Installations,” *Energies*, 15(21). Available at: <https://doi.org/10.3390/en15218108>.
- Mudiantoro, B. (2024) *Addressing the Challenges in Renewable Energy Development Towards Energy Transition in Indonesia*. Available at: <https://doi.org/dx.doi.org/10.7488/era/5020>.
- Murillo-Calderon, I.A. (2026) “Experimental assessment of acid gas energy recovery potential in refinery operations,” *Journal of Engineering and Applied Science*, 73(1). Available at: <https://doi.org/10.1186/s44147-026-00953-4>.
- Olayiwola, O., Cali, U. and Elsdén, M. (2025) “Enhanced Solar Photovoltaic System Management and Integration : The Digital Twin Concept.”
- Pavlyuk, D. and Alomar, I. (2026) “Artificial Intelligence Technologies for Aircraft Maintenance: A Systematic Literature Review,” *International Journal of Prognostics and Health Management*, 17(1). Available at: <https://doi.org/10.36001/ijphm.2026.v17i1.4567>.
- Reddy, V.R. *et al.* (2026) “Development of an AI-Powered IoT-Based Smart Energy Management System for Sustainable Urban Infrastructure,” *Dandao Xuebao/Journal of Ballistics*, 37(1), pp. 267–273. Available at: <https://doi.org/10.52783/DXJB.V37.202>.
- Shahverdian, M.H. *et al.* (2026) “Multi-physics approach of bifacial PV systems using hybrid optimization of one- and two-diode models,” *Results in Engineering*, 29. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108951>.
- Sifat, M.M.H. *et al.* (2026) “Digital twin based microgrid control and energy management: Trends, challenges, and future directions, Computer Electrol and energy management: Trends, challenges, and future directions,” *Computers and Electrical Engineering*, 134. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2026.111100>.
- Siregar, zurfri hasrudy, Febryan, A. and Budiani, I.T. (2025) “Application Of Renewable Energy Architectural Approaches In The Design Of Nusantara Energy Creative In Tembung Village , Percut Sei Tuan District , Deli Serdang Regency,” *journal vorteks*, 06(02), pp. 510–520. Available at: <https://doi.org/10.54123/vorteks.v6i2.476>.
- Siregar, Z. hasrudy *et al.* (2025) “Electrical , And Civil Engineering Iot Integrated Automatic Water Filter System Using Coarse Filter Media And Upflow Method,” *journal vorteks*, 06(02), pp. 594–605. Available at: <https://doi.org/10.54123/vorteks.v6i2.482>.
- Siregar, Z.H. (2020) “rancangan kincir angin prototipe 18 PU 400,” *journal VORTEKS*, 01(01), pp. 30–43. Available at: <https://doi.org/10.54123/vorteks.v1i1>.
- Tarigan, E. (2025) “Identification of early operational defects in photovoltaic modules : A case study of a 24 . 9 MWp solar PV system in Sumatra , Indonesia,” *Unconventional Resources*, 6(December 2024), p. 100156. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.unres.2025.100156>.
- Zabala, S. *et al.* (2026) “Artificial Intelligence, Algorithmic Ethics, and Digital Inequality: A Bibliometric Mapping in the Digital Media Era,” *Applied Sciences (Switzerland)*, 16(6). Available at: <https://doi.org/10.3390/app16063056>.
- Zohri, M. *et al.* (2024) “Sustainability index and a bibliometric of photovoltaic thermal with rectangular channel,” *Case Studies in Thermal Engineering*, 63. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105300>.