

Otomasi Cerdas Produksi dan Rantai Pasok Digital : Analisis Bibliometrik dan Tinjauan Sistematis

Dewi Sari Pinandita*¹, Agung Prayudha Hidayat¹, Annisa Kartinawati¹,
Sri Indrawati², Suhendi Irawan¹

¹Program Studi Manajemen Industri, Sekolah Vokasi, IPB University, Bogor

²Program Studi Teknik Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

e-mail: *dspinandita@apps.ipb.ac.id, agungprayudha@apps.ipb.ac.id,

annisakartinawati@apps.ipb.ac.id, sriindrawati@uii.ac.id, suhendiirawan1@apps.ipb.ac.id

(artikel diterima: 08-05-2026, artikel disetujui: 18-05-2026)

Abstrak

Transformasi digital dan otomasi cerdas semakin penting bagi manajemen produksi dan rantai pasok. Hal ini karena perusahaan harus merespons volatilitas permintaan, kompleksitas operasi, dan tekanan keberlanjutan. Penelitian ini bertujuan mengkaji perkembangan penerapan kecerdasan buatan, *internet of things*, *smart manufacturing*, dan *Industry 4.0/5.0* dalam produksi serta rantai pasok melalui *systematic literature review* yang diperkuat analisis bibliometrik. Data bibliometrik dianalisis menggunakan *Bibliometrix/Biblioshiny* terhadap 109 dokumen dari 99 sumber publikasi pada periode 2021-2026. Hasil analisis menunjukkan pertumbuhan publikasi yang tinggi dengan *annual growth rate* 45,41%, melibatkan 359 penulis, 313 kata kunci penulis, 6.142 referensi, dan *international co-authorship* 31,19%. Peta *co-occurrence* memperlihatkan bahwa *artificial intelligence*, *supply chain management*, *industry 4.0*, *internet of things*, *decision making*, dan *smart manufacturing* menjadi simpul utama struktur pengetahuan. *Thematic map* menunjukkan *decision making*, *internet of things*, dan *smart manufacturing* sebagai *motor theme*, sedangkan *artificial intelligence* dan *supply chain management* menjadi *basic theme* yang relevan tetapi masih membutuhkan konsolidasi konseptual. Temuan ini menegaskan bahwa transformasi digital tidak cukup dipahami sebagai adopsi teknologi, melainkan sebagai sistem keputusan sosio-teknis yang memadukan data, algoritma, manusia, etika, dan tata kelola. Artikel ini berkontribusi dengan menyintesis agenda penelitian yang menyeimbangkan efisiensi teknis, kolaborasi manusia-AI, interpretabilitas, dan keberlanjutan rantai pasok.

Kata kunci: *artificial intelligence, bibliometrix, industri 5.0, manajemen produksi, rantai pasok*

Abstract

Digital transformation and intelligent automation are increasingly important for production and supply chain management because firms must respond to demand volatility, operational complexity, and sustainability pressures. This study aims to examine the development of artificial intelligence, internet of things, smart manufacturing, and Industry 4.0/5.0 applications in production and supply chain systems through a systematic literature review supported by bibliometric analysis. Bibliometric data were analyzed using Bibliometrix/Biblioshiny based on 109 documents from 99 publication sources during 2021-2026. The results show rapid publication growth, with an annual growth rate of 45.41%, involving 359 authors, 313 author keywords, 6,142 references, and 31.19% international co-authorship. The keyword co-occurrence map indicates that artificial intelligence, supply chain management, Industry 4.0, internet of things, decision making, and smart manufacturing are the main nodes of the knowledge structure. The thematic map identifies decision making, internet of things, and smart manufacturing as motor themes, while artificial intelligence and supply chain management appear as basic themes that are highly relevant but still require conceptual consolidation. These findings confirm that digital transformation should not be

understood merely as technology adoption, but as a socio-technical decision system that integrates data, algorithms, humans, ethics, and governance. This article contributes by synthesizing a future research agenda that balances technical efficiency, human-AI collaboration, interpretability, and supply chain sustainability.

Keywords: *artificial intelligence, bibliometrix, industry 5.0, production management, supply chain*

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur global mengalami transformasi struktural yang didorong oleh peningkatan volatilitas permintaan, ketidakpastian pasokan, tekanan efisiensi operasional, serta tuntutan keberlanjutan. Dalam konteks tersebut, pendekatan manajemen produksi dan rantai pasok berbasis perencanaan statis memiliki keterbatasan dalam merespons dinamika pasar secara cepat dan adaptif. Transformasi digital berperan sebagai fondasi strategis yang mengintegrasikan proses produksi, data operasional, sistem analitik, dan keputusan manajerial dalam satu ekosistem yang lebih adaptif, dan responsif (Arinez et al., 2020).

Perkembangan industri 4.0 memperkuat integrasi sistem siber-fisik, *internet of things*, *big data*, *cloud computing*, dan *artificial intelligence* (AI) dalam proses manufaktur. Teknologi tersebut memungkinkan perusahaan mengumpulkan data *real-time* dari mesin, sensor, gudang, pemasok, dan pelanggan, lalu mengubahnya menjadi dasar keputusan operasional. Dalam manajemen produksi, AI digunakan untuk *quality control*, *predictive maintenance*, perencanaan kapasitas, penjadwalan dan optimalisasi rantai pasokan (Shrivastava et al., 2025). Dalam rantai pasok, AI berperan dalam perkiraan permintaan, optimasi distribusi, pengelolaan persediaan, mitigasi risiko, dan peningkatan ketahanan rantai pasok (Dong, 2022; González Rodríguez et al., 2020; Yu, 2022).

Arah perkembangan tersebut menjadi semakin kompleks seiring dengan berkembangnya konsep industri 5.0 yang menambahkan dimensi *human-centricity*, keberlanjutan, dan resiliensi. Dalam kerangka tersebut, otomasi tidak diposisikan sebagai pengganti peran manusia, melainkan sebagai sistem yang memperkuat kolaborasi sinergis antara manusia dan mesin. Oleh karena itu, keberhasilan transformasi digital tidak cukup diukur dari efisiensi algoritmik, tetapi juga dari interpretabilitas keputusan, kesiapan organisasi, kualitas data, tata kelola etis, dan dampaknya terhadap tenaga kerja (Samek et al., 2021; Siau dan Wang, 2020; Vlacic et al., 2024).

Meskipun literatur mengenai AI, *smart manufacturing*, dan *supply chain management* berkembang cepat. Beberapa penelitian studi literatur yang telah dilakukan mengkaji dampak transformatif teknologi Industri 4.0 terhadap otomatisasi produksi dan rantai pasok digital, dengan fokus pada teknologi canggih seperti *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), dan *blockchain*. Penelitian yang dilakukan (Qu et al., 2025; Raza et al., 2023; Song & Cheng, 2025; Zahid, 2025) menggunakan metodologi bibliometrik atau tinjauan sistematis untuk menganalisis tren dan wawasan di bidang tersebut, sedangkan Sedangkan penelitian Dixit et al (2024) melakukan evaluasi pada beberapa referensi dengan pendekatan kumpulan studi kasus kualitatif untuk mengeksplorasi implikasi praktis digitalisasi dalam konteks manufaktur tertentu. Seluruh studi menekankan pentingnya transformasi digital dalam meningkatkan efisiensi rantai pasokan dan pengambilan keputusan dengan pendekatan dan fokus yang bervariasi.

Penelitian Song & Cheng (2025) dan Raza et al (2023) membahas manfaat lingkungan dari implementasi teknologi industri 4.0, terutama dalam pengurangan emisi karbon dan praktek berkelanjutan melalui penggunaan *blockchain* dan *IoT*. Sedangkan studi yang dilakukan Dixit et al (2024) berfokus pada peningkatan kinerja produksi melalui digitalisasi manufaktur berupa aplikasi praktis dan strategi transformasi digital yang komprehensif. Sementara studi yang dilakukan Qu et al (2025) lebih memprioritaskan aspek efisiensi operasional dan digitalisasi. Penelitian tersebut belum membahas lebih mendalam mengenai aspek manusia, etika, dan kesiapan organisasi belum secara konsisten pada kerangka analisis. Kesenjangan ini menjadi krusial karena sistem produksi dan rantai pasok digital bersifat sosio-teknis dengan performa teknologi sangat ditentukan oleh kualitas interaksi antara data, algoritma, manusia, proses bisnis, dan kebijakan organisasi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan transformasi digital dan otomasi cerdas dalam manajemen produksi dan rantai pasok melalui *systematic literature review* yang diperkuat analisis bibliometrik. Fokus kajian diarahkan pada pemetaan struktur pengetahuan, identifikasi tema utama, pembacaan celah penelitian, serta perumusan agenda penelitian masa depan yang lebih seimbang antara efisiensi teknis dan keberlanjutan sosio-teknis.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan *systematic literature review* (SLR) yang diperkuat dengan analisis bibliometrik. SLR digunakan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menyintesis literatur mengenai transformasi digital, otomasi cerdas, AI, manajemen produksi, dan rantai pasok secara sistematis. Pendekatan bibliometrik digunakan sebagai pelengkap untuk membaca struktur pengetahuan, hubungan kata kunci, tingkat kematangan tema, serta pola kolaborasi negara (Aria dan Cuccurullo, 2017; Kitchenham, 2007; Tranfield et al., 2003).

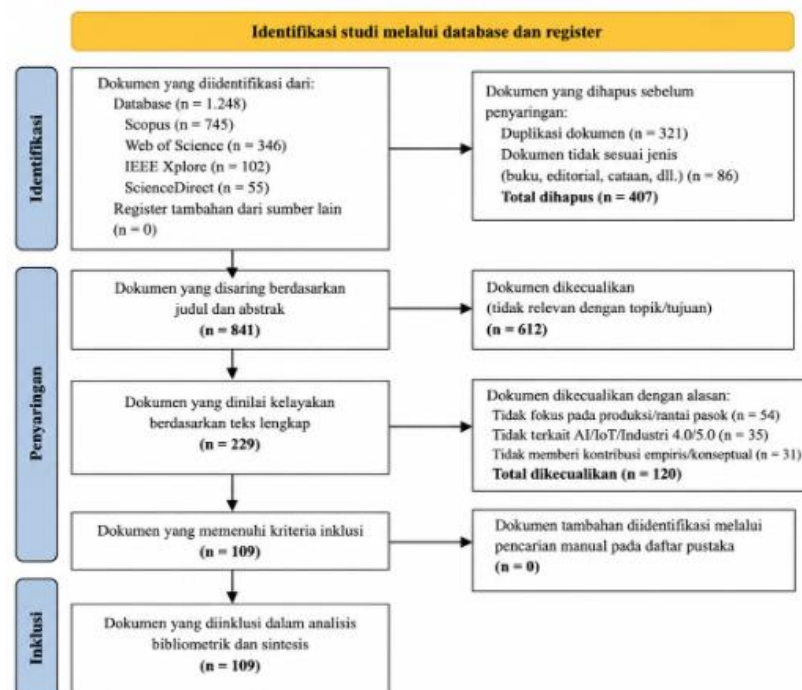
Kombinasi SLR dan bibliometrik dipilih karena topik ini berkembang cepat dan melibatkan banyak disiplin, mulai dari teknik industri, manajemen operasi, sistem informasi, kecerdasan buatan, hingga manajemen rantai pasok. Dengan pendekatan gabungan, analisis tidak hanya menilai isi literatur secara naratif, tetapi juga memetakan posisi tema berdasarkan pola publikasi dan keterhubungan konsep.

2.2 Pengumpulan dan Seleksi Literatur

Literatur dikumpulkan dari database akademik terkemuka, yaitu *Scopus*, *Web of Science*, dan *IEEE Xplore* dengan fokus pada publikasi *peer-reviewed journals* dan *conference proceedings* dengan kata kunci *artificial intelligence*, *digital transformation*, *smart manufacturing*, *industry 4.0*, *industry 5.0*, *production management*, dan *supply chain management*. Ketujuh kata kunci tersebut ditetapkan berdasarkan penjabaran konsep utama yang mengacu pada fokus utama penelitian serta tujuan riset, yaitu transformasi digital dan otomasi cerdas dalam manajemen produksi dan rantai pasok. Selain itu, pemilihan kata kunci juga mengacu pada taksonomi domain industri manufaktur dan rantai pasok yang telah mapan, seperti konsep industri 4.0 dan 5.0 dan aplikasi AI, untuk memastikan relevansi dan cakupan literatur yang sistematis dan komprehensif. Dengan demikian, kata kunci ini menjadi landasan konseptual yang tepat untuk pencarian dan analisis literatur terkait. Kriteria inklusi mencakup artikel yang membahas penerapan teknologi digital atau AI dalam

produksi dan rantai pasok, diterbitkan pada periode 2021–2026, serta memiliki metadata bibliografi yang lengkap untuk analisis bibliometrik dan dokumen duplikat. artikel tanpa metadata memadai, serta dokumen non-relevan dieksklusi. Dengan pendekatan ini, penelitian memastikan replikasi metodologi dan keterbukaan data.

Proses seleksi literatur divisualisasikan menggunakan diagram PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) yang menampilkan tahapan identifikasi, screening, *eligibility*, dan *included studies* untuk memastikan transparansi metodologis. Dataset akhir yang digunakan dalam analisis bibliometrik terdiri atas 109 dokumen dari 99 sumber publikasi. Dataset tersebut mencakup 359 penulis, 313 *author keywords*, dan 6.142 referensi. Indikator ini digunakan untuk membaca perkembangan penelitian, tingkat kolaborasi, dan konsentrasi tema dalam bidang transformasi digital produksi dan rantai pasok.



Gambar 1 Diagram Prisma

2.3 Analisis Bibliometrik

Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan paket *Bibliometrix/Biblioshiny*. Empat luaran utama dianalisis, yaitu ringkasan statistik publikasi, *co-occurrence* kata kunci penulis, *thematic map*, dan *country collaboration map*. Ringkasan statistik digunakan untuk membaca pertumbuhan publikasi dan karakteristik umum dataset. *Co-occurrence map* digunakan untuk mengidentifikasi simpul konsep dan hubungan antar-tema. *Thematic map* digunakan untuk menilai posisi tema berdasarkan *centrality* dan *density*, sedangkan *country collaboration map* digunakan untuk membaca pola kolaborasi lintas negara.

Hasil bibliometrik kemudian disintesis dengan hasil SLR. Dalam penelitian ini, hasil visualisasi tidak dinarasikan ulang secara deskriptif, tetapi digunakan untuk memperkuat argumen ilmiah mengenai arah perkembangan penelitian, celah konseptual, serta agenda penelitian masa depan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil Bibliometrik Publikasi

Hasil bibliometrik menunjukkan bahwa kajian mengenai transformasi digital, otomasi cerdas, AI, produksi, dan rantai pasok merupakan bidang yang berkembang sangat cepat. Pada periode 2021-2026, *dataset* memuat 109 dokumen dari 99 sumber publikasi, dengan *annual growth rate* sebesar 45,41% seperti terlihat pada Gambar 1. Pertumbuhan ini mengindikasikan bahwa topik tersebut tidak lagi berada pada tahap pengenalan konseptual, tetapi telah memasuki fase ekspansi akademik yang intensif.

Jumlah 359 penulis, rata-rata 3,44 *co-authors per document*, dan *international co-authorship* 31,19% menunjukkan bahwa bidang ini bersifat kolaboratif dan multidisipliner. Pada saat yang sama, 313 *author keywords* dan 6.142 referensi memperlihatkan keragaman pendekatan konseptual serta metodologis. Rata-rata usia dokumen sebesar 1,47 tahun mengonfirmasi bahwa literatur masih sangat baru, sedangkan rata-rata jumlah kutipan per dokumen sebesar 11,31 menunjukkan bahwa publikasi awal dalam bidang ini telah memperoleh perhatian akademik yang cukup kuat.



Gambar 2 Ringkasan indikator bibliometrik publikasi 2021-2026

3.2 Struktur pengetahuan berdasarkan *co-occurrence* kata kunci

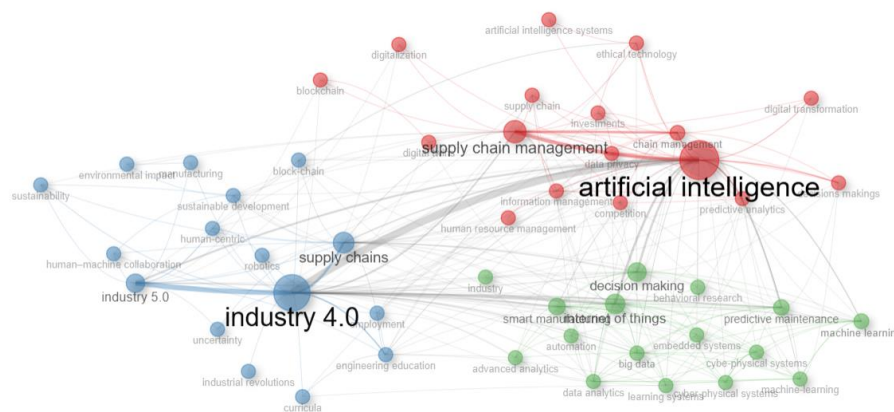
Peta *co-occurrence* kata kunci memperlihatkan bahwa struktur pengetahuan bidang ini dibentuk oleh beberapa klaster utama seperti terlihat pada Gambar 2. Klaster pertama berpusat pada *artificial intelligence* dan *supply chain management* yang berasosiasi dengan *chain management*, *digital transformation*, *predictive analytics*, *information management*, *investments*, *data privacy*, dan *decision making*. Posisi ini menunjukkan bahwa AI telah menjadi simpul pengorganisasi utama dalam diskusi rantai pasok digital, terutama untuk mendukung keputusan berbasis data, prediksi, dan koordinasi jaringan.

Klaster kedua berpusat pada *Industry 4.0*, *supply chains*, dan *Industry 5.0* yang terhubung dengan *sustainable development*, *human-machine collaboration*, *robotics*, *environmental impact*, *uncertainty*, dan *engineering education*. Pola keterhubungan ini mengindikasikan bahwa transformasi digital tidak semata-mata dipahami sebagai peningkatan efisiensi melalui otomasi teknis. Sebaliknya, transformasi tersebut merefleksikan perubahan sistemik yang mencakup dimensi keberlanjutan, kesiapan sumber daya manusia, serta integrasi kolaboratif antara manusia dan teknologi dalam ekosistem industri yang lebih kompleks.

Klaster ketiga mencakup *internet of things*, *smart manufacturing*, *decision making*, *machine learning*, *predictive maintenance*, *big data*, *data analytics*,

embedded systems, dan *cyber-physical systems*. Klaster ini merepresentasikan fondasi operasional dari manufaktur cerdas yang berbasis pada integrasi teknologi digital secara menyeluruh. Secara konseptual, keterkaitan antar elemen tersebut menunjukkan bahwa sistem produksi *modern* bergantung pada sinergi antara sensor, konektivitas, pemrosesan data, dan sistem siber-fisik untuk menghasilkan pengambilan keputusan yang lebih cepat, akurat, dan adaptif terhadap dinamika operasional.

Dari ketiga klaster tersebut maka dapat diidentifikasi arah utama pengembangan transformasi digital dalam produksi dan rantai pasok yang berfokus pada lima pilar utama. Lima pilar tersebut adalah optimasi rantai pasok, penjadwalan produksi, AI manufaktur, peramalan dinamis, dan sinergi manusia-AI. Kelima pilar ini menjadi kerangka kerja yang menjembatani penerapan teknologi digital mutakhir dengan kebutuhan operasional dan strategis, sehingga memandu penelitian lebih lanjut dalam mengembangkan solusi yang komprehensif dan terintegrasi untuk manufaktur cerdas.



Gambar 3 Peta *co-occurrence* kata kunci penulis

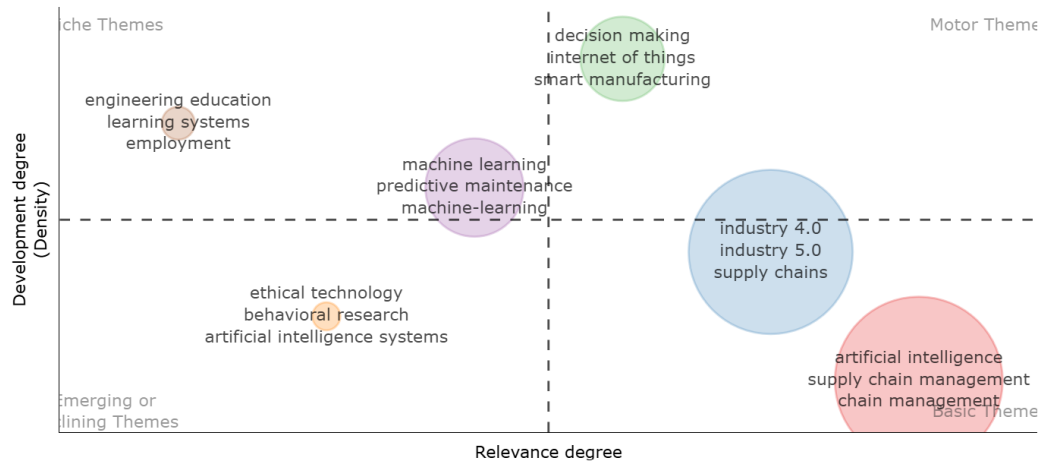
3.3 Thematic Map dan Tingkat Kematangan Tema

Thematic map memberikan pembacaan yang lebih strategis karena memposisikan tema berdasarkan *relevance degree* atau *centrality* dan *development degree* atau *density*. Tema *decision making*, *internet of things*, dan *smart manufacturing* berada pada kuadran *motor theme* seperti terlihat pada Gambar 3. Artinya, tema ini tidak hanya relevan terhadap struktur bidang secara keseluruhan, tetapi juga telah memiliki kepadatan internal yang relatif kuat. Secara substantif, *motor theme* tersebut menunjukkan bahwa agenda penelitian paling matang bergerak pada integrasi IoT dan manufaktur cerdas untuk meningkatkan kualitas pengambilan keputusan.

Artificial intelligence, *supply chain management*, dan *chain management* berada pada *kuadran basic theme*. *Industry 4.0*, *Industry 5.0*, dan *supply chains* juga tampil sebagai *basic theme* dengan tingkat relevansi tinggi, tetapi kepadatan pengembangannya masih lebih rendah dibandingkan *motor theme*. Posisi ini penting karena AI dan manajemen rantai pasok telah menjadi fondasi besar bidang kajian, tetapi masih membutuhkan pendalaman teoretis, standardisasi konsep, dan pengujian empiris lintas konteks industri.

Tema *engineering education*, *learning systems*, dan *employment* berada pada kuadran *niche theme*. Hal ini mengindikasikan bahwa tema tersebut relatif berkembang secara internal, tetapi belum menjadi simpul sentral dalam medan

penelitian utama. Sementara itu, *ethical technology*, *behavioral research*, dan *artificial intelligence systems* berada pada area *emerging or declining themes*. Posisi tersebut tidak selalu berarti tema ini menurun, tetapi dapat menunjukkan bahwa aspek etika, perilaku, dan tata kelola AI belum sepenuhnya terintegrasi dalam arus utama penelitian produksi dan rantai pasok.



Gambar 4 Thematic map berdasarkan centrality dan density kata kunci

Peta tematik ini mengarahkan desain penelitian pada lima (5) pilar utama transformasi digital seperti optimasi rantai pasok, penjadwalan produksi, AI manufaktur, peramalan dinamis, dan sinergi manusia-AI. Desain penelitian ini menitikberatkan pengembangan tema dalam kuadran *motor theme* seperti *decision making*, *IoT*, dan *smart manufacturing* yang saat ini sedang menjadi topik bahasan. Tema dasar seperti AI dan *supply chain management* perlu pendalaman teoretis dan pengujian empiris untuk memperkuat fondasi konseptual. Selain itu, fokus pada tema keberlanjutan sosio-teknis seperti etika dan tata kelola AI dibutuhkan untuk mengintegrasikan aspek sosial dan manusia dalam transformasi digital. Dengan demikian, peta tematik ini memberi argumen ilmiah bahwa penelitian harus seimbang antara penguatan teknologi inti, pengembangan kerangka konseptual yang kokoh, dan integrasi aspek manusia serta etika demi sistem produksi dan rantai pasok yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

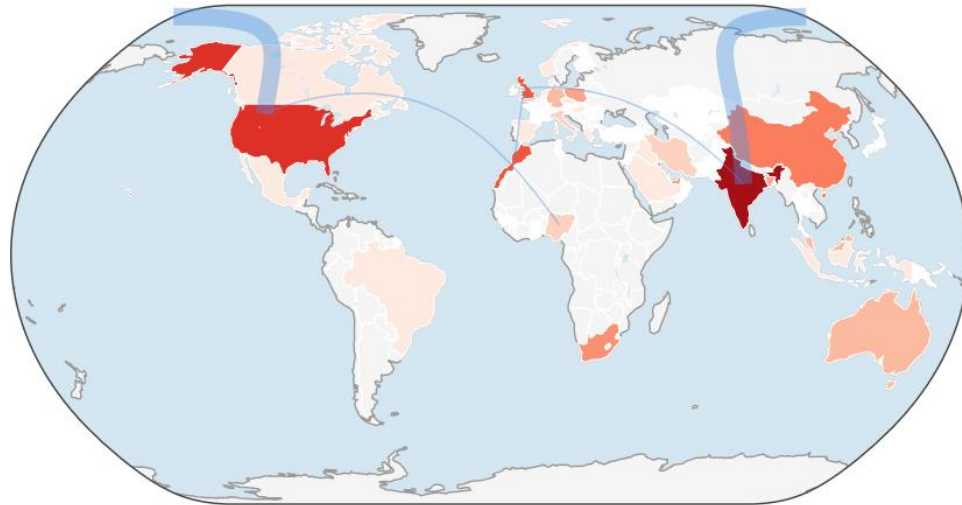
3.4 Peta Kolaborasi Negara

Peta kolaborasi negara menunjukkan bahwa penelitian mengenai AI, transformasi digital, manufaktur cerdas, dan rantai pasok tidak terkonsentrasi pada satu wilayah saja. Jaringan kolaborasi tampak menghubungkan Amerika Utara, Eropa, dan Asia, dengan keterlibatan menonjol dari Amerika Serikat, India, Tiongkok, Inggris, dan Australia seperti terlihat pada Gambar 4. Pola ini menunjukkan bahwa transformasi digital manufaktur dan rantai pasok merupakan agenda global yang relevan bagi negara dengan basis industri, teknologi, dan logistik yang berkembang.

Meskipun demikian, *international co-authorship* sebesar 31,19% menunjukkan bahwa kolaborasi lintas negara masih berada pada tingkat moderat. Dengan demikian, terdapat ruang untuk memperkuat penelitian komparatif lintas negara, terutama yang menghubungkan negara maju, negara industri baru, dan negara berkembang. Perbedaan kesiapan infrastruktur digital, standar interoperabilitas, kualitas data, serta kapabilitas usaha kecil dan menengah (UKM) dapat memengaruhi keberhasilan implementasi AI dan otomasi cerdas.

Implikasi penting dari peta kolaborasi ini adalah perlunya agenda penelitian yang lebih inklusif terhadap konteks *Global South*, UKM, dan industri dengan

keterbatasan sumber daya. Perluasan konteks tersebut menjadi penting untuk memastikan relevansi model dalam berbagai kondisi operasional. Tanpa upaya tersebut, pengembangan model AI dan sistem otomasi berisiko menghasilkan bias yang cenderung mengakomodasi industri dengan infrastruktur data yang telah matang.



Gambar 5 Peta Kolaborasi Negara dalam Publikasi terkait Transformasi Digital dan AI

3.5 Pilar Transformasi Digital dan Otomasi Cerdas

Hasil SLR memperlihatkan bahwa transformasi digital dalam produksi dan rantai pasok bertumpu pada lima (5) pilar utama untuk pengembangan transformasi digital dalam produksi dan rantai pasok. Pilar pertama adalah optimasi rantai pasok dan logistik berbasis kecerdasan komputasi. Algoritma seperti *genetic algorithm*, *ant colony optimization*, *particle swarm optimization*, dan *machine learning* banyak digunakan untuk menyelesaikan persoalan distribusi, persediaan, alokasi kapasitas, serta *reverse logistics*. Keunggulan pendekatan ini terletak pada kemampuannya menangani masalah stokastik dan *non-linear* yang sulit diselesaikan dengan metode manual (Alfayoumi et al., 2023; Dong, 2022; Yu, 2022).

Pilar kedua adalah perencanaan dan penjadwalan produksi cerdas. Dalam konteks manufaktur modern, sistem pendukung keputusan yang menggabungkan *metaheuristik*, *fuzzy logic*, dan *machine learning* dapat meningkatkan fleksibilitas penjadwalan, terutama ketika permintaan, kapasitas, dan kualitas material berubah secara cepat (González Rodríguez et al., 2020). Pilar ketiga adalah integrasi AI dalam proses manufaktur, termasuk *quality control*, *predictive maintenance*, dan *digital twin*. Pendekatan *deep learning* dan *explainable AI* (XAI) semakin penting karena perusahaan tidak hanya membutuhkan prediksi akurat, tetapi juga keputusan yang dapat dipahami oleh manajer dan operator (Honti et al., 2024; Samek et al., 2021).

Tabel 1 Sintesis pilar transformasi digital dan agenda penelitian

Pilar	Kontribusi utama	Isu kritis	Agenda penelitian
Optimasi rantai pasok	Menekan biaya, waktu, dan risiko persediaan	Ketidakpastian permintaan dan kualitas data	Model adaptif lintas skenario
Penjadwalan produksi	Meningkatkan fleksibilitas kapasitas dan urutan kerja	Gangguan operasional dan keterbatasan UKM	DSS yang mudah diadopsi

AI manufaktur	Mendukung <i>quality control</i> dan <i>predictive maintenance</i>	<i>Black box</i> dan kebutuhan interpretabilitas	Integrasi XAI dan digital twin
Peramalan dinamis	Meningkatkan akurasi prediksi berbasis eksternal	Volatilitas pasar dan generalisasi model	Validasi lintas industri
Sinergi manusia-AI	Memadukan komputasi dan pengetahuan tacit	Etika, kepercayaan, dan kesiapan SDM	Kerangka <i>human-centered automation</i>

Pilar keempat adalah peramalan permintaan dinamis yang menggabungkan variabel internal dan eksternal. Model prediktif berbasis *deep learning* dapat diperluas dengan indikator pasar, biaya operasional, dan sinyal makroekonomi untuk meningkatkan ketahanan sistem produksi terhadap fluktuasi permintaan. Pilar kelima adalah sinergi manusia-AI dalam perencanaan strategis. Pada pilar ini, AI berperan sebagai sistem pendukung keputusan, sedangkan manusia tetap memegang peran penting dalam interpretasi konteks, pertimbangan etis, dan pengetahuan tacit organisasi (Nonaka dan Takeuchi, 1995; Siau dan Wang, 2020).

3.6 Kesepakatan, Perdebatan, dan Gap Penelitian

Secara umum, literatur menunjukkan kesepakatan bahwa teknologi digital, AI, IoT, dan *smart manufacturing* dapat meningkatkan efisiensi, akurasi keputusan, dan ketahanan rantai pasok. Kesepakatan ini sejalan dengan posisi AI dan *supply chain management* sebagai *basic theme* serta *decision making*, IoT, dan *smart manufacturing* sebagai *motor theme* pada *thematic map*. Dengan demikian, inti perkembangan penelitian terletak pada kemampuan menghubungkan data *real-time* dengan pengambilan keputusan produksi dan rantai pasok.

Meskipun demikian, literatur juga mengidentifikasi sejumlah perdebatan konseptual yang signifikan. Pertama, terdapat perbedaan terkait dominasi otomatisasi penuh dan kendali manusia dalam sistem. Sebagian penelitian menekankan otonomi sistem, sedangkan perspektif *Industry 5.0* menegaskan bahwa manusia tetap diperlukan untuk menangani konteks, nilai, dan pengetahuan tacit. Kedua, terdapat perdebatan antara akurasi model dan interpretabilitas. Model AI yang kompleks dapat memberikan prediksi kuat, tetapi kurang dapat dipercaya apabila tidak menjelaskan dasar keputusan secara transparan (Adadi dan Berrada, 2018; Liao et al., 2021). Ketiga, perdebatan muncul antara efisiensi teknis dan keberlanjutan sosio-teknis.

Mayoritas penelitian masih menempatkan pengurangan biaya dan peningkatan produktivitas sebagai tujuan utama dalam implementasi transformasi digital. Sementara itu, aspek etika, dinamika perubahan pekerjaan, kesiapan tenaga kerja, dan tata kelola data belum dipertimbangkan dalam kerangka analisis. Oleh karena itu, artikel ini berkontribusi dengan menekankan bahwa transformasi digital perlu dipahami sebagai suatu sistem pengambilan keputusan yang terintegrasi, yang menghubungkan teknologi, manusia, proses bisnis, dan tata kelola dalam satu kerangka yang seimbang.

3.7 Implikasi Teoretis dan Manajerial

Secara teoretis, artikel ini memperjelas bahwa literatur transformasi digital produksi dan rantai pasok sedang bergerak dari pembahasan teknologi tunggal menuju ekosistem keputusan terintegrasi. AI, IoT, dan *smart manufacturing* bukan elemen yang berdiri sendiri, melainkan bagian dari arsitektur sosio-teknis yang

menghubungkan data, algoritma, aktor manusia, dan tujuan keberlanjutan. Dengan demikian, penelitian selanjutnya perlu menguji hubungan antara kapabilitas digital, kualitas keputusan, interpretabilitas, dan performa rantai pasok secara lebih empiris.

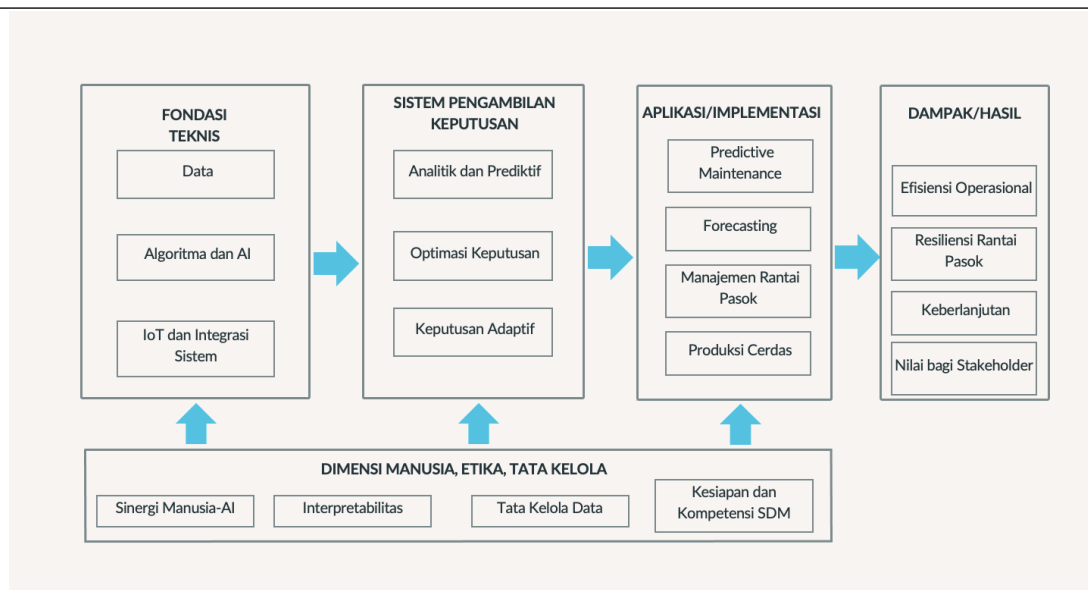
Secara manajerial, temuan ini menunjukkan bahwa perusahaan tidak cukup hanya mengadopsi perangkat digital. Organisasi perlu menyiapkan kualitas data, interoperabilitas sistem, literasi analitik, mekanisme validasi model, serta tata kelola etis. Bagi UKM, transformasi digital sebaiknya dirancang secara bertahap berdasarkan kemampuan finansial dan teknis. Transformasi dapat dilakukan berbasis modular dan penggunaan *platform* digital yang terjangkau, *user-friendly*, serta berorientasi pada manfaat operasional jangka pendek untuk meningkatkan visibilitas data, dan efisiensi proses. Sementara itu, bagi perusahaan besar, tantangan utama terletak pada kompleksitas integrasi sistem AI dan otomasi ke dalam keputusan *end-to-end* tanpa mengabaikan transparansi, akuntabilitas, dan kesiapan tenaga kerja.

3.8 Kerangka Konseptual Transformasi Digital Produksi dan Rantai Pasok

Dari lima (5) pilar utama transformasi digital yaitu optimasi rantai pasok, penjadwalan produksi, AI manufaktur, peramalan dinamis, dan sinergi manusia-AI, dihasilkan kerangka konseptual penelitian. Kerangka konseptual dalam penelitian ini memandang transformasi digital bukan sekadar sebagai penerapan teknologi, tetapi sebagai suatu sistem sosio-teknis yang saling terhubung dan berlapis. Sistem ini mengintegrasikan kapabilitas teknologi, proses pengambilan keputusan, implementasi di lapangan, serta peran manusia dan tata kelola dalam satu kesatuan yang utuh. Pada tahap awal, teknologi seperti *artificial intelligence* (AI), *internet of things* (IoT), dan sistem integrasi data berperan sebagai fondasi yang menyediakan aliran data secara real-time sekaligus kemampuan analitik. Namun demikian, hasil *thematic map* menunjukkan bahwa meskipun AI memiliki tingkat relevansi yang tinggi, pengembangannya secara konseptual dalam konteks produksi dan rantai pasok masih perlu diperkuat, terutama dalam hal integrasi sistem dan kualitas pengolahan data.

Selanjutnya, kapabilitas teknologi tersebut diterjemahkan ke dalam lapisan kecerdasan operasional, di mana data diolah menjadi dasar pengambilan keputusan. Pada tahap ini, sistem seperti *decision support system*, *smart manufacturing*, serta optimasi rantai pasok dan penjadwalan produksi memainkan peran penting dalam menghasilkan keputusan yang cepat, adaptif, dan responsif terhadap perubahan permintaan maupun gangguan operasional. Keputusan-keputusan tersebut kemudian diimplementasikan dalam bentuk aplikasi nyata, seperti *predictive maintenance*, peramalan dinamis, dan otomasi proses produksi. Dengan demikian, transformasi digital tidak hanya berhenti pada penggunaan teknologi, tetapi benar-benar memberikan nilai tambah melalui keputusan yang berdampak langsung pada kinerja operasional.

Di sisi lain, keberhasilan transformasi digital tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga sangat bergantung pada peran manusia dan tata kelola yang menyertainya. Faktor seperti kepercayaan terhadap sistem, transparansi dalam penggunaan algoritma, kesiapan tenaga kerja, serta pengelolaan data yang baik menjadi elemen penting yang dapat memperkuat atau justru menghambat implementasi di lapangan. Temuan ini sejalan dengan masih terbatasnya perhatian terhadap isu etika dan perilaku dalam literatur. Oleh karena itu, kerangka ini menekankan bahwa transformasi digital yang berhasil adalah transformasi yang mampu menyeimbangkan teknologi dengan aspek manusia dan tata kelola, sehingga menghasilkan sistem produksi dan rantai pasok yang tidak hanya efisien, tetapi juga tangguh dan berkelanjutan.



Gambar 6 Kerangka Konseptual Transformasi Digital Produksi dan Rantai Pasok

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa transformasi digital dan otomasi cerdas telah menjadi agenda penting dalam manajemen produksi dan rantai pasok. Hasil bibliometrik terhadap 109 dokumen pada periode 2021-2026 memperlihatkan pertumbuhan publikasi yang cepat, struktur pengetahuan yang berpusat pada *artificial intelligence*, *supply chain management*, *Industry 4.0/5.0*, *IoT*, *smart manufacturing*, dan *decision making*, serta pola kolaborasi internasional yang masih memiliki potensi pengembangan lebih lanjut. Temuan utama mengindikasikan bahwa *decision making*, *IoT*, dan *smart manufacturing* berkembang sebagai *motor theme*, sementara *artificial intelligence* dan *supply chain management* berperan sebagai tema dasar yang relevan namun masih memerlukan konsolidasi konseptual yang lebih kuat. SLR yang dilakukan memperkuat hasil ini dengan mengidentifikasi lima pilar utama transformasi digital, yaitu optimasi rantai pasok, penjadwalan produksi cerdas, AI manufaktur, peramalan permintaan dinamis, dan sinergi manusia-AI.

Kerangka konseptual yang dibangun dalam penelitian ini menegaskan bahwa transformasi digital bukan sekadar penerapan teknologi, melainkan sistem sosio-teknis yang mengintegrasikan kapabilitas teknologi seperti AI dan IoT, proses pengambilan keputusan adaptif, pelaksanaan operasional, serta peran manusia dan tata kelola yang menyertainya. Kelima pilar tersebut merupakan bentuk aktualisasi dari kerangka ini, yang secara bersama-sama membentuk ekosistem transformasi digital yang efisien, responsif, dan berkelanjutan. Dalam penerapannya di lapangan, hal ini menuntut organisasi untuk tidak hanya mengadopsi teknologi secara teknis, tetapi juga membangun budaya kerja yang mendukung kolaborasi manusia-mesin, memastikan transparansi dan interpretabilitas sistem, serta mengembangkan kemampuan adaptasi dalam menghadapi perubahan operasional. Oleh karena itu, keberhasilan transformasi digital tergantung pada keseimbangan sinergis antara teknologi, proses bisnis, manusia, dan aspek tata kelola, termasuk transparansi algoritma dan kesiapan organisasi.

Kontribusi artikel ini terletak pada penegasan bahwa transformasi digital bukan sekadar adopsi teknologi, melainkan sistem keputusan sosio-teknis yang mengintegrasikan data, algoritma, manusia, etika, dan tata kelola. Penelitian

selanjutnya dapat menguji kerangka konseptual ini secara empiris di berbagai konteks industri, khususnya pada UKM serta negara berkembang yang memiliki tantangan unik. Penelitian lanjutan juga perlu dilakukan dengan memperkuat pengukuran terhadap interpretabilitas AI, kesiapan tenaga kerja, tata kelola data, dan dampak keberlanjutan sosial serta lingkungan. Pendekatan ini diharapkan dapat mengatasi kesenjangan konseptual yang masih ada dan mendukung pengembangan manufaktur cerdas yang lebih inklusif dan adaptif di era Industri 4.0 dan 5.0.

DAFTAR PUSTAKA

- Adadi, A. dan Berrada, M., 2018, Explainable AI: A review of methods and applications, *Information Fusion*, vol 57, hal 82-91, <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>
- Alfayoumi, S., Eltazi, N. dan Elgammal, A., 2023, AI-driven optimization approach based on genetic algorithm in mass customization supplying and manufacturing, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol 14, no 11. <https://10.14569/IJACSA.2023.01411106>
- Aria, M. dan Cuccurullo, C., 2017, bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis, *Journal of Informetrics*, vol 11, no 4, hal 959-975, <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.
- Arinez, J. F., Chang, Q., Gao, R. X., Xu, C. dan Zhang, J., 2020, Artificial intelligence in advanced manufacturing: Current status and future outlook, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol 142, no 11, hal 1-16, <https://doi.org/10.1115/1.4047855>.
- Denyer, D. dan Tranfield, D., 2009, *Producing a systematic review*, Buchanan, D. A. dan Bryman, A. (ed.): The SAGE Handbook of Organizational Research Methods, Sage Publications, London.
- Dong, Y., 2022, Optimization and analysis of raw material supply chain based on computational intelligence, *Mobile Information Systems*, vol 2022, artikel 8683598. <https://doi.org/10.1155/2022/8683598>
- Dixit, C., Haleem, A., & Javaid, M. (2024). Role of Digital Supply Chain in Industry 4.0: A Bibliometric Analysis. *Journal of Industrial Integration and Management*, 9(4), 495–518. <https://doi.org/10.1142/S2424862224500106>
- González Rodríguez, G., Gonzalez-Cava, J. M. dan Méndez Pérez, J. A., 2020, An intelligent decision support system for production planning based on machine learning, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol 31, hal 1257-1273. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01510-y>
- Honti, B., Farkas, A., Nagy, Z. K., Pataki, H. dan Nagy, B., 2024, Explainable deep recurrent neural networks for the batch analysis of a pharmaceutical tableting process in the spirit of Pharma 4.0, *International Journal of Pharmaceutics*, vol 662, artikel 124509. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.124509>
- Hu, L., Wang, C. dan Fan, T., 2024, Sustainable operation and management of a dynamic supply chain under the framework of a community with a shared future for mankind, *Sustainability*, vol 16, no 17, artikel 7780. <https://doi.org/10.3390/su16177780>

- Kitchenham, B., 2007, *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering*, Technical Report, Keele University and Durham University.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. dan Sihm, W., 2018, Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, *IFAC-PapersOnLine*, vol 51, no 11, hal 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lee, J., Bagheri, B. dan Jin, C., 2016, Introduction to cyber manufacturing, *Manufacturing Letters*, vol 8, hal 11-15. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2016.05.002>
- Liao, Q. V., Gruen, D. M. dan Miller, S., 2021, Questioning AI: Informing design for explainable AI user experiences, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, hal 1-16. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445331>
- Munn, Z., Peters, M. D. J., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A. dan Aromataris, E., 2018, Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach, *BMC Medical Research Methodology*, vol 18, artikel 143. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>
- Nonaka, I. dan Takeuchi, H., 1995, *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*, Oxford University Press, New York.
- Qu, S., Li, X., Lim, M. K., Liu, W., Li, Z., & Wang, Y., 2025, Smart supply chain management: a systematic literature review and future research agenda. *International Journal of Logistics Research and Applications*. <https://doi.org/10.1080/13675567.2025.2569701>
- Raza, S. A., Govindaluri, S. M., & Bhutta, M. K., 2023, Research themes in machine learning applications in supply chain management using bibliometric analysis tools. *Benchmarking*, 30(3), 834–867. <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2021-0755>
- Samek, W., Wiegand, T. dan Müller, K. R., 2021, Explainable artificial intelligence: Understanding, visualizing and interpreting deep learning models, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol 38, no 1, hal 22-59. <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.3019877>
- Sahoo, S. K., Goswami, S. S., Sarkar, S. dan Mitra, S., 2023, A review of digital transformation and Industry 4.0 in supply chain management for small and medium-sized enterprises, *Spectrum of Engineering and Management Sciences*, vol 1, no 1, hal 58-70. <https://doi.org/10.31181/sems1120237j>
- Siau, K. dan Wang, W., 2020, Artificial intelligence ethics: Ethics of AI and ethical AI, *Journal of Database Management*, vol 31, no 2, hal 58-68. <https://doi.org/10.4018/JDM.2020040105>
- Shrivastava, A., Praveen, R. V. S., Muhsnhasan, M., Bansal, S., Dwivedi, S. P., & Krishna, O. (2025). Industry 4.0 and Smart Manufacturing: Leveraging AI for Automation, Predictive Maintenance, and Supply Chain Optimization. *2025 International Conference on Computing and Communications, Computingcon*

2025. <https://doi.org/10.1109/COMPUTINGCON64838.2025.11376637>
- Song, L., & Cheng, L. (2025). Research Status and Trends in the Field of Digital Supply Chain—A CiteSpace-Based Bibliometric Analysis. *Proceedings of 2025 International Conference on Management Science and Computer Engineering, MSCE 2025*, 683–689. <https://doi.org/10.1145/3760023.3760131>
- Tao, F., Zhang, M., Liu, Y. dan Nee, A. Y. C., 2018, Digital twin in industry: State-of-the-art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol 15, no 4, hal 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tranfield, D., Denyer, D. dan Smart, P., 2003, Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review, *British Journal of Management*, vol 14, no 3, hal 207-222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Vlacic, L., Huang, H., Dotoli, M., Wang, Y., Ioannou, P. A., Fan, L., Wang, X., Carli, R., Lv, C., Li, L., Na, X., Han, Q. L. dan Wang, F. Y., 2024, Automation 5.0: The key to systems intelligence and Industry 5.0, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol 11, no 8, hal 1723-1727. <https://doi.org/10.1109/JAS.2024.124635>
- Wang, L., Törngren, M. dan Onori, M., 2020, Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, vol 49, hal 254-273. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.004>
- Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C. dan Thoben, K. D., 2016, Machine learning in manufacturing: Advantages, challenges, and applications, *Production & Manufacturing Research*, vol 4, no 1, hal 23-45. <https://doi.org/10.1080/21693277.2016.1192517>
- Yu, H., 2022, Modeling a remanufacturing reverse logistics planning problem: Some insights into disruptive technology adoption, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 123, hal 4231-4249. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1940773/v1>
- Zahid, A., 2025, Exploring the potential of industry 4 . 0 in manufacturing and supply chain systems : Insights and emerging trends from bibliometric analysis. *Supply Chain Analytics*, 10(January), 100108. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100108>