

Systematic Literature Review of Digital Transformation KPIs in Industry 4.0 for Smart Manufacturing

Enita Pasaribu^{1*}, Endah Tri Yuliani², Fahri Fadli³, Fransisca Debora⁴

^{1,2,3} Departemen Teknik Industri, Universitas Mercu Buana, Jakarta

⁴ Departemen Teknik Industri, Universitas Singaperbangsa, Karawang

*Email korespondensi penulis: enitapasaribu93@gmail.com

Abstrak

Digitalisasi menghadirkan revolusi di sektor manufaktur yang mengacu pada transisi dari teknologi tradisional ke digital yang membentuk bagian integral dari Industri 4.0. Saat ini, inovasi digital terkait erat dengan "keberlanjutan" perusahaan. *Smart Manufacturing* dianggap sebagai paradigma baru yang membuat pekerjaan lebih cerdas dan lebih terhubung, menghadirkan kecepatan dan fleksibilitas melalui pengenalan inovasi digital. *Smart Manufacturing* adalah implementasi fisik dan operasional dari sebagian besar transformasi digital di sektor industri dan Digital Transformation KPIs adalah alat untuk mengukur keberhasilan implementasi tersebut. Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan tinjauan pustaka sistematis menggunakan metode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk memastikan proses identifikasi, seleksi, dan analisis artikel yang transparan dan *replicable*. Data dari artikel-artikel tersebut kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak VOSViewer untuk memvisualisasikan hubungan antar kata kunci, penulis, atau konsep, sehingga memungkinkan identifikasi tren penelitian, kluster topik, serta area riset yang kurang terjamah. Tujuan artikel ini adalah untuk menyajikan literatur relevan yang membahas Digital Transformation KPIs di Industri 4.0 terhadap Smart Manufacturing dan mengidentifikasi tantangan utama, dengan menyajikan hasil tinjauan pustaka dari berbagai jurnal. Sebanyak 35 artikel dimasukkan dalam penelitian ini yang diterbitkan antara 2019 dan 2025. Artikel diidentifikasi berdasarkan tahun, negara, publikasi dan objek penelitian. Hasilnya menunjukkan bahwa Key Performance Indicators (KPIs) memainkan peran sentral dan krusial dalam keberhasilan implementasi Transformasi Digital dalam Industri 4.0 untuk *Smart Manufacturing*, khususnya di sektor manufaktur, dengan tujuan utama untuk meningkatkan efisiensi operasional, keberlanjutan, dan kinerja bisnis secara keseluruhan.

Kata Kunci: *Digital Transformation KPIs, Industri 4.0, Smart Manufacturing*

Abstract

Digitization has brought about a revolution in the manufacturing sector, referring to the transition from traditional to digital technologies that form an integral part of Industry 4.0. Today, digital innovation is closely linked to corporate sustainability. Smart Manufacturing is regarded as a new paradigm that enables work to become smarter and more connected, delivering speed and flexibility through the adoption of digital innovations. Smart Manufacturing represents the physical and operational implementation of much of the digital transformation within the industrial sector, and Digital Transformation KPIs serve as tools for measuring the success of this implementation. This study was conducted using a systematic literature review approach based on the PRISMA method (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) to ensure a transparent and replicable process of identifying, selecting, and analyzing articles. Data from the selected articles were then analyzed using VOSviewer software to visualize the relationships among keywords, authors, or concepts, thereby enabling the identification of research trends, topic clusters, and underexplored research areas. The purpose of this article is to present relevant literature discussing Digital Transformation KPIs in Industry 4.0 as they relate to Smart Manufacturing and to identify key challenges by providing a comprehensive review of various scholarly journals. A total of 35 articles published between 2019 and 2025 were included in this study. The articles were categorized based on year of publication, country, publisher, and research object. The findings indicate that Key Performance Indicators (KPIs) play a central and crucial role in the successful implementation of

Digital Transformation within Industry 4.0 for Smart Manufacturing, particularly in the manufacturing sector, with the primary goal of enhancing operational efficiency, sustainability, and overall business performance.

Keywords: *Digital Transformation KPIs, Industry 4.0, Smart Manufacturing*

1. Pendahuluan

Digitalisasi menghadirkan proses utama transisi dari metode kerja tradisional ke teknologi digital. Dalam industri modern, kemajuan besar telah dicapai di bidang teknologi informasi, otomasi, dan robotika (Somohano & Madrid, 2022). Semua pencapaian teknologi ini merupakan prasyarat untuk pengembangan Industri 4.0, yang menghadirkan tren digitalisasi, otomasi, dan pertukaran data terkini dalam produksi. Industri 4.0 adalah era industri baru yang mentransformasi semua proses secara digital di seluruh industri, dari manufaktur hingga logistik, melalui teknologi inovatif (Frank et al., 2019). Meskipun transformasi digital dan Industri 4.0 telah menjadi fokus utama dalam sektor manufaktur, masih terdapat beberapa gap penelitian yang kritis dimana tidak ada kerangka KPI yang terstandarisasi untuk mengukur keberhasilan transformasi digital di *smart manufacturing*. Pertama, studi sebelumnya cenderung terfragmentasi berdasarkan sektor atau teknologi tertentu (misal: IoT, AI), sehingga menyulitkan perusahaan untuk mengadopsi pendekatan holistik. Kedua, terdapat kesenjangan implementasi, dimana banyak penelitian mengusulkan konsep KPI digital, tetapi minim bukti empiris tentang tantangan praktis dalam penerapannya, terutama di UKM dengan sumber daya terbatas (Fabac, 2022). Ketiga, dinamika teknologi vs KPI dimana Perkembangan teknologi seperti *digital twin* dan AI membutuhkan KPI yang dinamis, namun literatur belum sepenuhnya mengeksplorasi metode adaptasi KPI terhadap perubahan teknologi (Bican & Brem, 2020). Keempat, aspek non-teknis yaitu dampak faktor manusia (misal: resistensi karyawan, kesiapan budaya organisasi) terhadap pengukuran KPI digital sering diabaikan (Cijan et al., 2019). Digitalisasi telah memengaruhi Digital Transformation KPIs dalam beberapa cara. Hal ini memungkinkan perusahaan untuk mengukur dan menganalisis KPI guna mengumpulkan lebih banyak data menggunakan teknologi seperti (IoT), Machine Learning (ML), Artificial Intelligence (AI) dan juga *Digital Twin* untuk memperluas rangkaian KPI yang digunakan dan diukur oleh perusahaan, serta memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang proses perusahaan (Engenharia, 2024). Hal ini juga telah memberdayakan inovasi tambahan dalam cara perusahaan beroperasi, yang membutuhkan KPI baru untuk mengukur kinerja perusahaan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkonsolidasikan indikator kinerja kunci transformasi digital di Industri 4.0 ke dalam kerangka terstruktur berdasarkan *domain* (operasional, kualitas, rantai pasok, keberlanjutan, dan kematangan digital). Menganalisis hambatan praktis dalam penerapan KPI digital, termasuk ketersediaan data *real-time*, standarisasi, dan keamanan siber. Menyelidiki bagaimana AI, *big data analytics*, dan *digital twin* dapat memperluas cakupan KPI tradisional (contoh: dari OEE ke *predictive maintenance*) dan merumuskan pedoman bagi perusahaan manufaktur (terutama UKM) untuk memilih, mengadaptasi, dan mengintegrasikan KPI digital sesuai konteks spesifik perusahaan manufaktur.

2. Landasan Teori

2.1. Transformasi Digital di Industri 4.0

Transformasi digital dalam *smart manufacturing* merupakan integrasi teknologi digital seperti Internet of Things (IoT), *big data analytics*, kecerdasan buatan (AI), dan komputasi awan (*cloud computing*) ke dalam proses manufaktur (Kagermann et al., 2013). Industri 4.0 menekankan pada otomasi, pertukaran data real-time, dan sistem siber-fisik (*cyber-physical systems*) untuk meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, dan keberlanjutan (Lasi et al., 2014).

2.2. Key Performance Indicators (KPIs) dalam Transformasi Digital

KPIs digunakan untuk mengukur keberhasilan implementasi transformasi digital di *smart manufacturing*. Beberapa kategori utama KPIs meliputi:

a. Operational Efficiency

- Overall Equipment Effectiveness (OEE): Mengukur produktivitas mesin dengan memperhitungkan *availability*, *performance*, dan *quality* (Nakajima, 1988).
- Cycle Time Reduction: Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu siklus produksi (Schuh et al., 2017).

b. Quality Management

- Defect Rate: Persentase produk cacat dalam proses produksi (Tao et al., 2018).
- First Pass Yield (FPY): Jumlah produk yang memenuhi standar kualitas tanpa perbaikan (Zheng et al., 2021).

c. Supply Chain and Logistics

- On-Time Delivery (OTD): Ketepatan pengiriman produk ke pelanggan (Ivanov et al., 2019).
- Inventory Turnover: Efisiensi manajemen persediaan (Strozzi et al., 2017).

d. Sustainability and Energy Efficiency

- Energy Consumption per Unit: Pengukuran efisiensi energi dalam produksi (Garetti et al., 2012).
- Carbon Footprint Reduction: Dampak lingkungan dari proses manufaktur (Kiel et al., 2017).

e. Digital Maturity and Innovation

- Adoption Rate of IoT/AI Technologies: Tingkat implementasi teknologi digital (Rüßmann et al., 2015).
- Data-Driven Decision-Making: Penggunaan analitik data untuk pengambilan keputusan (Lee et al., 2018).

2.3. Tantangan dalam Pengukuran KPIs

Beberapa tantangan dalam menentukan KPIs untuk transformasi digital meliputi:

- Ketersediaan Data Real-Time: Integrasi sensor IoT dan sistem monitoring (Wan et al., 2016).
- Standardisasi Metrik: Perbedaan definisi KPIs antar industri (Moeuf et al., 2018).
- Keamanan Siber: Risiko gangguan pada sistem digital (Zheng et al., 2021).

3. Metodologi

Sebagai alat penelitian ilmiah sekunder, SLR menerapkan metode sistematis untuk mengumpulkan dan mensintesis data dari sumber-sumber primer, seperti literatur ilmiah, dengan tujuan memberikan gagasan dan informasi yang berharga bagi komunitas ilmiah. Secara definitif, Tinjauan Pustaka Sistematis (SLR) bertujuan untuk menyurvei dan mengevaluasi secara kritis penelitian dengan cakupan yang seragam, sehingga menghasilkan ringkasan komprehensif mengenai keadaan terkini dalam suatu bidang subjek. SLR yang ketat menekankan transparansi dan kejelasan melalui penerapan protokol spesifik. Artikel ini menggunakan metode PRISMA untuk memastikan proses identifikasi, seleksi, dan analisis artikel yang transparan dan *replicable*.

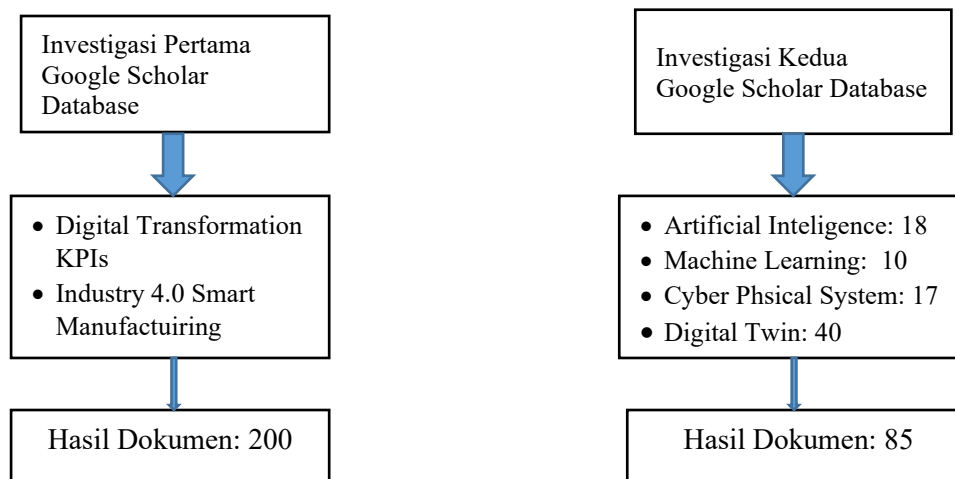
3.1 Identifikasi Pertanyaan Penelitian

Tujuan utama survei kami adalah untuk menjawab pertanyaan Bagaimana dampak dan hasil dari implementasi Digital Transformation KPIs dalam konteks Industri 4.0 untuk Smart Manufacturing? Pertanyaan ini muncul ketika menyelidiki topik tentang Digital Transformation KPIs dalam industri 4.0 untuk Smart Manufacturing. Terkait hal ini, pertanyaan penelitian utama yang menjadi dasar survei dirangkum di sini:

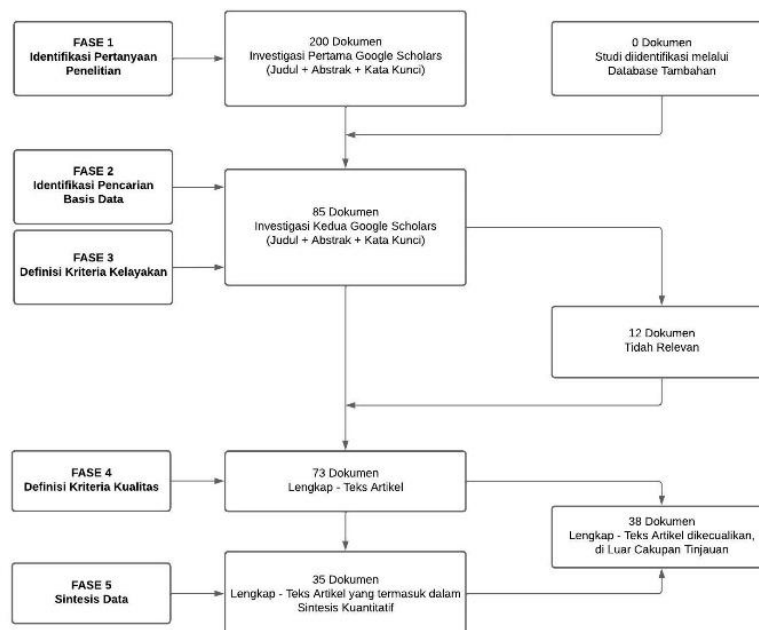
1. Bagaimana definisi dan metode pengukuran KPI Transformasi Digital diuraikan dalam literatur terkait Industri 4.0 untuk Smart Manufacturing?
2. Apa tantangan dan faktor keberhasilan yang diidentifikasi dalam penerapan KPI Transformasi Digital di lingkungan Smart Manufacturing Industri 4.0?
3. Kontribusi apa yang bisa diberikan oleh teori, penelitian, dan studi kasus yang baru?
4. Sektor industri mana yang lebih terlibat terhadap penerapan Digital Transformation KPIs Industri 4.0 untuk Smart Manufacturing?

3.2 Identifikasi Pencarian Basis Data

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi studi sebanyak mungkin terkait topik yang diminati, demi menghasilkan daftar makalah yang komprehensif dari semua sumber yang relevan. Dalam upaya ini, data bibliometrik dikumpulkan dari basis data Google Scholar, yang merupakan salah satu basis data abstrak dan sitasi terbesar untuk literatur yang telah dilalui *peer-reviewed literature*. Google Scholar mendukung sintaks Boolean, yaitu jenis pencarian yang memungkinkan pengguna menggabungkan kata kunci dengan operator seperti AND, NOT, dan OR untuk menghasilkan hasil yang lebih relevan



Gambar 1. Skema Kueri Dan Hasil Terkait



Gambar 2. Metode PRISMA

3.3 Defenisi Kriteria Kelayakan

Pencarian otomatis seringkali menghasilkan temuan yang kurang relevan, sehingga dokumen yang tidak sesuai dengan pertanyaan penelitian atau identifikasi basis data akan dikesampingkan. Demikian pula, studi yang tidak mengulas kebijakan dan praktik manufaktur cerdas di berbagai negara/wilayah juga tidak diikutsertakan. Oleh karena itu, beberapa kriteria pengecualian dirumuskan dan dirangkum sebagai berikut:

1. Dokumen yang tidak membahas Digital Transformation KPIs Industry 4.0
2. Dokumen yang tidak membahas Digitalisasi untuk Smart Manufacturing
3. Dokumen yang tidak membahas Implementasi dan Pengembangan KPIs
4. Dokumen yang sumbernya kurang terpercaya dan bahasa yang sulit dipahami.

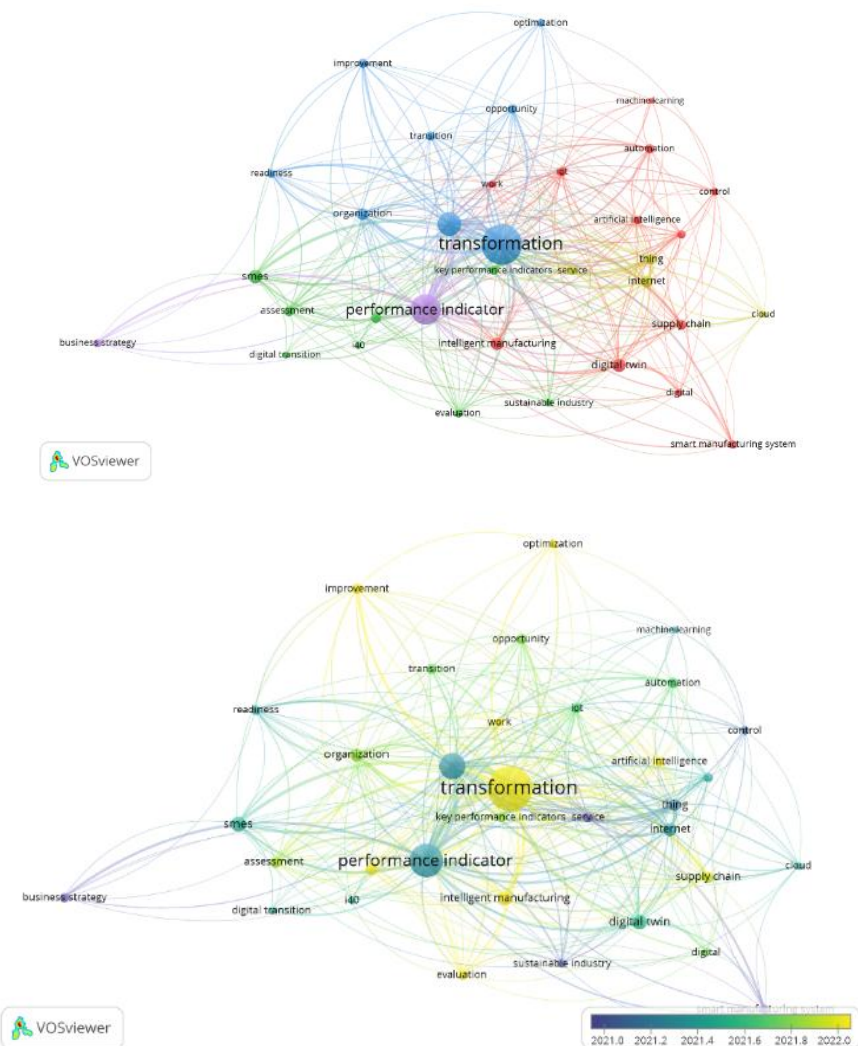
3.4 Defenisi Kriteria Kualitas

Untuk menghasilkan tinjauan yang komprehensif, kriteria pemilihan artikel berfokus pada pembahasan topik dari perspektif aplikatif, eksperimental, dan teoritis. Oleh karena itu, penelitian ini menetapkan kriteria utama sebagai berikut:

1. Dokumen dengan sumber ilmiah bereputasi
2. Dokumen dengan metodologi yang jelas dan teruji
3. Dokumen dengan relevansi inti yang kuat yang membahas topik penelitian
4. Dokumen dengan kebaruan dan signifikan

3.5 Sintesis Data

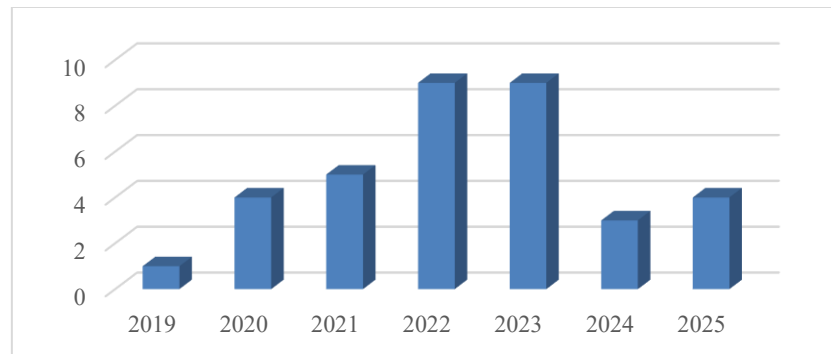
Berdasarkan penjelasan diatas, dokumen diidentifikasi dan diperiksa kelayakan dan relevansinya untuk membentuk set inklusi. Dalam penelitian ini, pemilihan dokumen dilakukan dengan menggunakan standar PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) dan pencarian data menggunakan software VOSviewer untuk memantau, memetakan, mengendalikan ilmiah, memastikan transparansi dan replikasi penelitian.



Gambar 3. Network and Overlay Visualization Digital Transfotomation KPIs

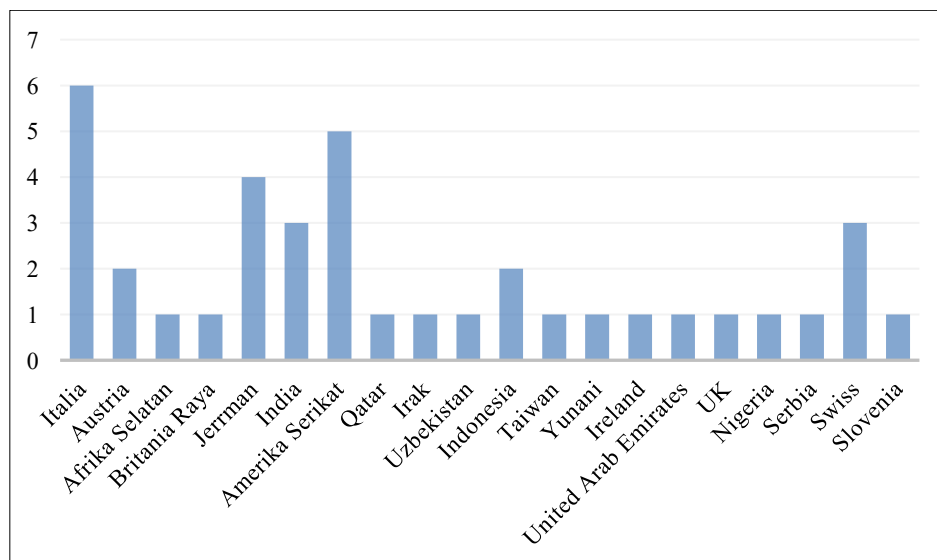
4. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan dan membahas temuan kajian. Pertama, tinjauan umum dari 35 studi terpilih disajikan. Semua artikel ini telah diklasifikasikan. Daftar lengkap artikel yang dianalisis akan dilampirkan dan fokus artikel ini mengacu pada: (1) Penulis, (2) Hasil, (3) Objek Penelitianl (4) Negara, (5) Publisher dan (6) Tahun. Analisis sampel yang dibandingkan dengan tahun publikasi menunjukkan bahwa penelitian telah berkembang dari tahun ke tahun dimulai sejak tahun 2019. Tren ini menegaskan minat yang besar terhadap topik ini. Yang paling terbanyak membahas terkait materi *Systematic Review of Digital Transformation KPIs in Industry 4.0 for Smart Manufacturing* berada di tahun 2022 dan 2023.

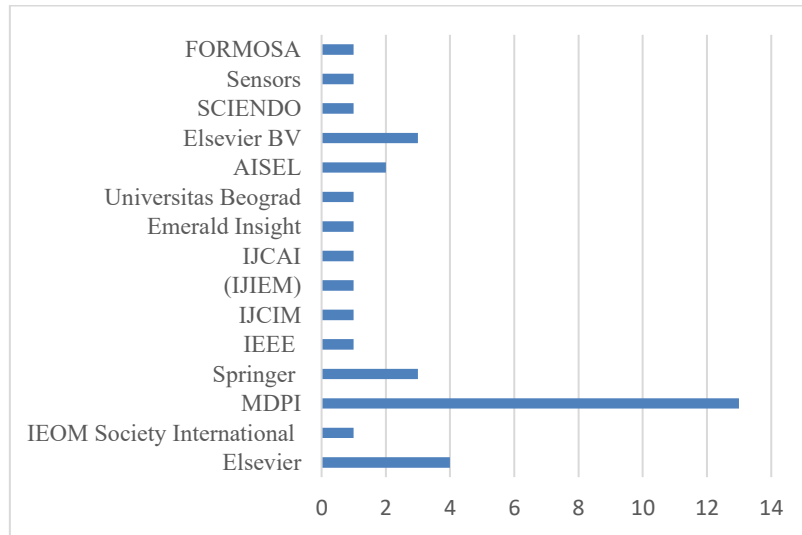


Gambar 5. Distribusi Berdasarkan Tahun

Angka tertinggi ini juga bisa menunjukkan bahwa periode ini adalah waktu ketika banyak perusahaan mulai secara aktif menerapkan teknologi dan strategi tersebut, memicu kebutuhan akan studi empiris dan kerangka kerja KPI. Tahun 2024 dan 2025 mengalami penurunan kemungkinan ini karena adanya stabilisasi yang membuat penelitian mungkin menjadi lebih kompleks dan membutuhkan waktu lebih lama untuk publikasi, sehingga jumlah artikel per tahun tampak menurun. Italia menjadi negara dengan kontribusi penelitian terbanyak. Ini menunjukkan minat dan aktivitas riset yang kuat dari Italia terkait transformasi digital, KPI, Industri 4.0, dan manufaktur cerdas. Sebagian besar riset (dalam sampel ini) berasal dari negara-negara maju di Eropa (Italia, Jerman, Austria, Swiss) dan Amerika Utara (AS), serta beberapa negara berkembang (India, Indonesia, Afrika Selatan). Ini mungkin mengindikasikan bahwa sebagian besar model, kerangka kerja, dan temuan KPI transformasi digital di Industri 4.0 mungkin berakar pada konteks ekonomi dan teknologi negara-negara ini. Negara-negara lain memiliki distribusi yang lebih heterogen.

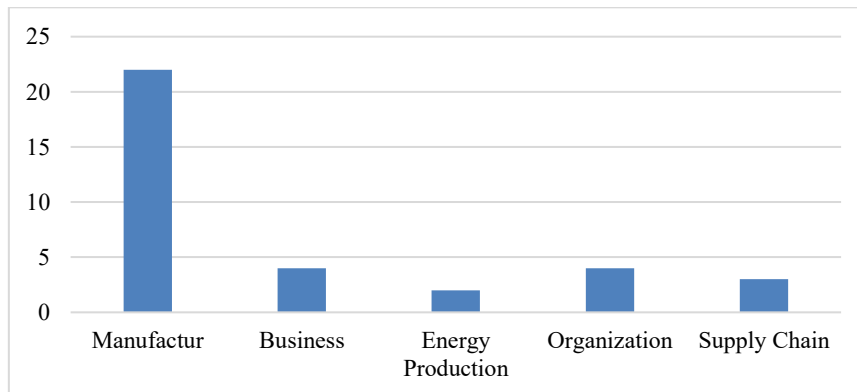


Gambar 6. Distribusi Berdasarkan Negara



Gambar 7. Distribusi Berdasarkan *Publisher*

Sebanyak 35 dokumen yang dipilih menunjukkan bahwa bidang Manufactur adalah yang paling dominan dengan jumlah tertinggi. Hal ini menggarisbawahi bahwa topik ini sangat relevan dan banyak diteliti dalam konteks produksi cerdas. Diikuti oleh kategori Business dan Organization yang menunjukkan adanya perhatian terhadap dampak transformasi digital pada proses bisnis yang lebih luas dan kapabilitas organisasi. Kemudian, Supply Chain menyoroti integrasi KPI dalam manajemen rantai pasokan yang tangguh. Kategori Energy Production adalah yang paling sedikit, menunjukkan bahwa meskipun ada penerapan di sektor energi, fokus utamanya tetap pada manufaktur.



Gambar 8. Distribusi Berdasarkan Objek

Tabel 1. Hasil Literature Review dari DTKPIs in Industry 4.0 For Smart Manufacturing

Penulis, Tahun	Hasil	Object	Negara	Publisher
(Contini et al., 2023)	Mengusulkan serangkaian KPI untuk membantu perusahaan manufaktur di industri keramik memantau indikator keberlanjutan	Manufacture	Italia	Elsevier
(Schumacher & Sihni, 2020)	Diusulkan sistem pemantauan komprehensif menggunakan 143 KPI untuk menilai dan mengontrol status implementasi Digitalisasi dan Otomasi Industri (DA)	Manufacture	Austria	Elsevier
(Sishi & Telukdarie, 2023)	Pengembangan KPI cerdas menggabungkan metrik organisasi dan wawasan analitik, didukung teknologi digital (seperti Big Data dan Analitik Data) serta AI, untuk optimasi bisnis	Business	Afrika Selatan	IEOM Society International

Penulis, Tahun	Hasil	Object	Negara	Publisher
(Panchal et al., 2024)	Menunjukkan peningkatan KPI inti dan operasional UKM melalui adopsi Industri 4.0 dan Business Intelligence dalam manufaktur digital	Manufacture	Britania Raya	Elsevier
(Pepe & Zanolli, 2024)	Mengevaluasi peran digitalisasi, Industri 4.0, data, KPI, modelisasi, dan prakiraan sebagai konsep dasar untuk meningkatkan efisiensi energi	Energy	Italia	MDPI
(Şener et al., 2022)	Mengusulkan kerangka pengukuran strategi transformasi digital cerdas untuk membantu perusahaan menilai kapabilitas dan memandu peningkatannya.	Organization and Social	Turkey	Springer
(Gadekar et al., 2022)	Dikembangkan model berbasis KPI terintegrasi untuk industri manufaktur guna menilai enam risiko implementasi Industri 4.0 (berdasarkan 16 KPI) yang memengaruhi keputusan adopsi organisasi	Manufacture	India	Springer
(Jeerreddy et al., 2019)	Menyajikan metode untuk memprediksi KPI manufaktur seperti unit produksi, cacat per unit, dan waktu pengerjaan ulang per cacat, dengan machine learning	Manufacture	USA	IEEE
(Aldoseri et al., 2024)	Mengembangkan pendekatan metodologis untuk menilai kondisi organisasi saat ini dalam transformasi digital berbasis AI, yang mencakup aspek data, teknologi, dan analitik yang relevan untuk KPI di manufaktur cerdas.		Qatar	MDPI
(El Kihel et al., 2023)	Menyajikan metodologi bernama PPTechIP yang memandu perusahaan dalam transformasi Industri 4.0 untuk membangun KPI yang andal, khususnya untuk manajemen rantai pasokan.	Supply Chain	Prancis	IJICIM
(Siedler et al., 2020)	Menawarkan pendekatan bagi UKM untuk memilih teknologi digital yang tepat dengan memetakan dampaknya pada KPI manufaktur, guna mengidentifikasi efek positif dan negatifnya.	Manufacture	Jerman	Elsevier
(Priatna et al., 2025)	Mengoptimalkan proses manufaktur cerdas dan manajemen sumber daya manusia. Hal ini berimplikasi pada peningkatan KPI dalam manufaktur cerdas melalui optimasi proses	Manufacture	Uzbekistan	(IJIEM)
(Tambare et al., 2022)	Membantu perusahaan manufaktur memahami dan mengimplementasikan standar yang relevan untuk mengukur kinerja dan mengelola kualitas di era Industri 4.0	Manufacture	India	MDPI
(Kovács, 2022)	Mengoptimalkan KPI dalam penjadwalan <i>semiconductor fab</i> . Implikasinya adalah peningkatan efisiensi dan metrik kinerja dalam manufaktur	Manufacture	Austria	IJCAI
(Contini & Peruzzini, 2022)	KPI keberlanjutan untuk perusahaan manufaktur di era Industri 4.0 mencakup aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi sepanjang siklus hidup produk dan rantai nilai, sehingga sangat relevan untuk manufaktur cerdas	Manufacture	Italia	MDPI

Penulis, Tahun	Hasil	Object	Negara	Publisher
(Marinagi et al., 2023)	Penelitian ini mengkaji bagaimana teknologi Industri 4.0 memengaruhi Indikator Kinerja Utama (KPI) dalam rantai pasokan yang tangguh.	Supply Chain	Yunani	MDPI
(Felice et al., 2025)	Mengoptimalkan kinerja manufaktur, yang pada gilirannya akan meningkatkan KPI dalam manufaktur cerdas.	Manufacture	Italia	MDPI
(Huang et al., 2021)	Meningkatkan efisiensi operasional, optimalisasi proses, dan prediktif maintenance dalam manufaktur cerdas, yang secara implisit menunjukkan peningkatan KPI seperti waktu henti mesin (downtime) dan kualitas produk.	Manufacture	Germany, USA	MDPI
(Trubetskaya et al., 2023)	Peningkatan parameter OEE (Overall Equipment Effectiveness) sebesar 10% menggunakan model digital twin, peningkatan efisiensi dan pemanfaatan aset, yang merupakan KPI kunci dalam manufaktur cerdas.	Manufacture	Ireland	Emerald Insight
(Pour et al., 2023)	Membantu perusahaan mengidentifikasi teknologi yang paling sesuai, yang secara tidak langsung berkontribusi pada peningkatan KPI transformasi digital seperti efisiensi implementasi dan ROI.	Manufacture	United Arab Emirates	MDPI
(Sufian et al., 2025)	Peningkatan efisiensi operasional dan kualitas produk, yang dapat direfleksikan dalam KPI seperti tingkat cacat berkurang dan waktu siklus produksi yang lebih cepat.	Manufacture	UK	MDPI
(Janković et al., 2024)	Digital KPIs dan Digital Transformation KPIs untuk optimalisasi proses produksi. Membantu mengidentifikasi KPI yang relevan untuk mengukur keberhasilan transformasi digital di manufaktur.	Manufacture	Serbia	Universitas Beograd
(Levkovsky et al., 2021)	Menekankan perlunya perusahaan untuk memahami dampak agar dapat mengukur keberhasilan transformasi, seperti efisiensi proses dan kepuasan pelanggan.	Business	Germany	AISEL
(Marcello et al., 2022)	Menyediakan pendekatan praktis dan mudah digunakan guna memandu pengambil keputusan dalam implementasi, adopsi, dan evaluasi kinerja teknologi I4.0. Hasilnya menunjukkan bahwa infrastruktur teknologi informasi dan kemampuan prediksi adalah KPI yang paling krusial dan berperan penting dalam konteks ini.	Energy Production	Italia	Elsevier BV
(Gadekar et al., 2022)	Hasilnya menunjukkan bahwa infrastruktur teknologi informasi dan kemampuan prediksi adalah KPI yang paling krusial dan berperan penting dalam konteks ini.	Organization	India	Springer
(Marinagi et al., 2023)	Menyelidiki teknologi Industri 4.0 mana yang dapat membantu meningkatkan Indikator Kinerja Utama (KPI) yang digunakan untuk menciptakan Rantai Pasokan Tangguh 4.0.	Supply Chain	Swiss	MDPI
(Contini et al., 2023)	Memungkinkan penilaian yang lebih spesifik terhadap dampak ekonomi, sosial, dan lingkungan dengan memastikan komunikasi kinerja yang transparan kepada para pemangku kepentingan.	Manufacture	Italy	Elsevier BV

Penulis, Tahun	Hasil	Object	Negara	Publisher
(Margherita et al., 2022)	Digitalisasi dapat membantu perusahaan dalam mendefinisikan dan menerapkan keberlanjutan dengan mengaitkan produksi dengan metrik evaluasi yang tepat.	Organization	Italy	MDPI
(Žižek et al., 2020)	Memberikan pemahaman yang jelas tentang bagaimana KPI berfungsi sebagai pilar penting untuk keberhasilan implementasi Industri 4.0 dalam praktik organisasi.	Organization	Slovenia	SCIENDO
(Tambare et al., 2021)	Membantu perusahaan manufaktur memahami dan mengimplementasikan standar yang relevan untuk mengukur kinerja dan mengelola kualitas di era Industri 4.0.	Manufacture	Switzerland	Sensors
(Levkovskyi et al., 2021)	Menciptakan keunggulan kompetitif, menggabungkan KPI untuk produksi, pemeliharaan, keberlanjutan, dan TI membantu mengurangi risiko proyek dan kompleksitas	Business	Amerika Serikat	AISeL
(Schumacher & Sihn, 2020)	Menunjukkan peningkatan objektivitas selama penilaian status KPI awal, penerimaan yang lebih tinggi terhadap status target KPI yang ditentukan, dan peningkatan penyelarasan	Manufacture	Austria	Elsevier BV
(Sufian et al., 2025)	Produktivitas meningkat sebagai hasil dari peningkatan 47% yang dilakukan pada pemanfaatan mesin dan pengurangan 53% dalam total pemborosan waktu henti.	Manufacture	Switzerland	MDPI
(Bianchini et al., 2024)	Pentingnya transisi dari big data ke smart data untuk mencapai hasil dalam hal efisiensi operasional, analisis biaya, manajemen beban kerja, pemanfaatan sumber daya, penyebaran pengetahuan, dan peningkatan keterlibatan operator.	Manufacture	Switzerland	MDPI
(Halim et al., 2023)	Perusahaan dengan strategi digital yang komprehensif cenderung lebih berhasil dan menunjukkan kinerja yang lebih baik.	Business	Indonesia	FORMOSA

Berdasarkan isi dan temuan yang telah dilakukan yang berfokus pada hubungan antara transformasi digital, Industri 4.0, dan KPIs dalam konteks manufaktur cerdas ada beberapa sudut pandang yang menarik yang memberi wasasan lebih lanjut tentang topik ini. Studi oleh Studi oleh (Bianchini et al., 2024) menyoroti pentingnya transisi dari *big data* ke *smart data*. Ini menunjukkan bahwa bukan hanya volume data yang penting, tetapi kemampuan untuk menganalisis dan mengubah data mentah menjadi informasi yang bermakna dan dapat ditindaklanjuti untuk KPI. Ini berarti fokus pada kualitas data, relevansinya, dan kemampuan untuk mendapatkan wawasan operasional yang jelas, analisis biaya, manajemen beban kerja, pemanfaatan sumber daya, dan penyebaran pengetahuan. Ini adalah perspektif penting karena perusahaan sering terjebak dalam pengumpulan data tanpa strategi yang jelas untuk penggunaannya. Ini menunjukkan pergeseran dari Big Data ke Smart Data untuk KPI yang dapat ditindaklanjuti.

Levkovskyi et al., (2021) menekankan bahwa transformasi digital memengaruhi seluruh proses bisnis, dan keberhasilan bergantung pada pemahaman dampak ini pada KPI. Sudut pandang yang menarik di sini adalah gagasan untuk menggabungkan KPI untuk produksi, pemeliharaan, keberlanjutan, dan TI. Pendekatan holistik ini membantu mengurangi kompleksitas dan risiko proyek transformasi digital secara keseluruhan. Ini menyoroti perlunya pandangan terintegrasi daripada silo departemen ketika mengukur keberhasilan transformasi digital. Žižek et al., (2020) memberikan pemahaman yang jelas tentang bagaimana KPI berfungsi sebagai pilar penting untuk keberhasilan implementasi Industri 4.0

dalam praktik organisasi. Yang menarik adalah penambahan "perspektif yang bertanggung jawab secara sosial." Ini menyiratkan bahwa KPI untuk Industri 4.0 tidak hanya harus fokus pada efisiensi dan keuntungan, tetapi juga mempertimbangkan dampak sosial, etika, dan keberlanjutan. Ini mendorong pendekatan yang lebih luas terhadap transformasi digital yang melampaui metrik keuangan semata, mencerminkan peningkatan kesadaran akan tanggung jawab perusahaan. Studi seperti Jeeretty et al., (2019) dan Kovács (2022) menunjukkan penggunaan pembelajaran mesin untuk memprediksi KPI. Sudut pandang ini menyoroti pergeseran dari pengukuran KPI yang bersifat retrospektif menjadi kemampuan prediktif. Dengan memanfaatkan AI dan machine learning, perusahaan dapat mengantisipasi masalah, mengoptimalkan proses secara proaktif, dan membuat keputusan yang lebih dinamis berdasarkan proyeksi KPI masa depan, bukan hanya data historis. Gadekar et al., (2022) juga mendukung ini dengan mengidentifikasi kemampuan prediksi sebagai KPI krusial. Secara keseluruhan, temuan dan sudut pandang ini menunjukkan bahwa KPI dalam konteks transformasi digital Industri 4.0 untuk manufaktur cerdas adalah bidang yang berkembang pesat, dengan penekanan yang semakin besar pada data yang cerdas, pendekatan holistik, pertimbangan sosial, kemampuan prediktif, dan strategi yang terencana dengan baik.

5. Kesimpulan

Kajian penelitian dengan topik Digital Transformation KPIs in Industry 4.0 for Smart Manufacturing memberikan kesimpulan bahwa Key Performance Indicators (KPIs) memainkan peran sentral dan krusial dalam keberhasilan implementasi Transformasi Digital dan Industri 4.0, khususnya di sektor manufaktur, dengan tujuan utama untuk meningkatkan efisiensi operasional, keberlanjutan, dan kinerja bisnis secara keseluruhan. Banyak penelitian secara eksplisit menyatakan bahwa KPI adalah pilar penting untuk keberhasilan implementasi Industri 4.0 dan transformasi digital, digunakan untuk menilai dan mengontrol status implementasi digitalisasi dan otomatisasi industri, serta membantu perusahaan memantau indikator keberlanjutan. Teknologi digital seperti Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), dan Digital Twin secara aktif digunakan untuk mengembangkan KPI cerdas, mengoptimalkan KPI dalam proses manufaktur dunia nyata, dan meningkatkan efisiensi operasional. Meskipun demikian, studi ini mengidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian yang krusial yang memerlukan perhatian lebih lanjut yaitu

- Banyak studi mengusulkan kerangka kerja, sistem pemantauan, atau metodologi pengembangan KPI, namun masih kurang detail mengenai tantangan praktis dan studi kasus mendalam tentang bagaimana perusahaan manufaktur, terutama UKM, berhasil (atau tidak berhasil) mengimplementasikan KPI transformasi digital dan Industri 4.0 dalam skala penuh.
- Dengan meningkatnya penggunaan Big Data, AI, dan Machine Learning dalam optimasi KPI, muncul pertanyaan penting mengenai keamanan data, privasi, dan implikasi etika dari pengumpulan dan penggunaan data dalam skala besar yang belum sepenuhnya dieksplorasi.
- Terdapat kesenjangan dalam pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana faktor manusia (misalnya, pelatihan, resistensi terhadap perubahan, keterampilan baru yang dibutuhkan) dan strategi manajemen perubahan memengaruhi keberhasilan implementasi dan pemanfaatan KPI transformasi digital oleh personel di lantai produksi dan manajemen.

Berdasarkan kesimpulan dan kesenjangan yang teridentifikasi, beberapa rekomendasi praktis dan implikasi strategis untuk perusahaan:

- Perusahaan harus bergerak melampaui metrik departemen individual dan mengintegrasikan KPI di seluruh fungsi (produksi, pemeliharaan, keberlanjutan, IT, rantai pasokan) untuk mendapatkan pandangan yang komprehensif tentang keberhasilan transformasi digital.
- Fokus pada Smart Data daripada Big Data, memprioritaskan kualitas, relevansi, dan kemampuan data untuk menghasilkan wawasan yang dapat ditindaklanjuti untuk KPI, bukan hanya volume data.
- Menyertakan strategi manajemen perubahan yang komprehensif yang mengatasi faktor manusia, seperti pelatihan karyawan, mengatasi resistensi, dan mengembangkan keterampilan baru yang diperlukan untuk pemanfaatan KPI digital yang efektif.

Studi ini memiliki beberapa keterbatasan yaitu mayoritas studi (80%) berasal dari negara maju (Eropa dan AS) sehingga temuan mungkin kurang relevan untuk konteks negara berkembang. Minimnya data kuantitatif jangka panjang tentang ROI KPI digital. Rekomendasi riset lanjutan yaitu mengeksplorasi

KPI untuk human-digital collaboration (misal: KPI kepuasan operator dalam lingkungan otomasi) dan studi komparatif antar sektor, misal: manufaktur vs. logistik untuk identifikasi KPI universal.

Daftar Pustaka

- Aldoseri, A., Al-Khalifa, K. N., & Hamouda, A. M. (2024). Methodological Approach to Assessing the Current State of Organizations for AI-Based Digital Transformation. *Applied System Innovation*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/asi7010014>
- Bianchini, A., Savini, I., Andreoni, A., Morolli, M., & Solfrini, V. (2024). Manufacturing Execution System Application within Manufacturing Small–Medium Enterprises towards Key Performance Indicators Development and Their Implementation in the Production Line. *Sustainability (Switzerland)*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/su16072974>
- Bican, P. M., & Brem, A. (2020). Digital Business Model, Digital Transformation, Digital Entrepreneurship: Is there a sustainable “digital”? *Sustainability (Switzerland)*, 12(13), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su12135239>
- Cijan, A., Jenič, L., Lamovšek, A., & Stemberger, J. (2019). How digitalization changes the workplace. *Dynamic Relationships Management Journal*, 8(1), 3–12. <https://doi.org/10.17708/DRMJ.2019.v08n01a01>
- Contini, G., & Peruzzini, M. (2022). Sustainability and industry 4.0: Definition of a set of key performance indicators for manufacturing companies. In *Sustainability*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/11004>
- Contini, G., Peruzzini, M., Bulgarelli, S., & Bosi, G. (2023). Developing key performance indicators for monitoring sustainability in the ceramic industry: The role of digitalization and industry 4.0 technologies. In *Journal of Cleaner Production*. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262301822X>
- El Kihel, Y., Zouggar Amrani, A., Ducq, Y., Amegouz, D., & Lfakir, A. (2023). Methodology combining industry 4.0 technologies and KPI’s reliability for supply chain performance. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(8), 1128–1152. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2162605>
- Engenharia, E. De. (2024). *José Pedro Ferreira Gomes Productivity Data Digitalization and Integration in Plant Management Software José Pedro Ferreira Gomes Productivity Data Digitalization and Integration in Plant Management Software*.
- Fabac, R. (2022). Digital Balanced Scorecard System as a Supporting Strategy for Digital Transformation. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159690>
- Felice, F. De, Luca, C. De, Petrillo, A., Forcina, A., Angel, M., Barrios, O., & Baffo, I. (2025). *The Role of Digital Transformation in Manufacturing: Discrete Event Simulation to Reshape Industrial Landscapes*. 1–35.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210(January), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Gadekar, R., Sarkar, B., & Gadekar, A. (2022). Key performance indicator based dynamic decision-making framework for sustainable Industry 4.0 implementation risks evaluation: reference to the Indian manufacturing industries. *Annals of Operations Research*, 318(1), 189–249. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04828-8>
- Halim, H., Kesuma, T. M., & Siregar, M. R. (2023). Digital transformation strategy to optimize company performance. In *Jurnal Manajemen Bisnis researchgate.net*. https://www.researchgate.net/profile/Hendra-Halim-4/publication/376078186_Digital_Transformation_Strategy_to_Optimize_Company_Performance/links/656916d4b86a1d521b1e2334/Digital-Transformation-Strategy-to-Optimize-Company-Performance.pdf
- Huang, Z., Shen, Y., Li, J., Fey, M., & Brecher, C. (2021). A survey on AI-driven digital twins in industry 4.0: Smart manufacturing and advanced robotics. In *Sensors*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/19/6340>
- Janković, N., Nikolić, I., & Rajković, T. (2024). Digital Transformation and Key Performance Indicators in Manufacturing: A Comprehensive Literature Review. *Proceedings Book of Abstract*.

- <https://rfos.fon.bg.ac.rs/handle/123456789/2775>
- Jeerreddy, S., Kennedy, K., Duffy, E., Walker, A., & Vorster, B. (2019). Machine Learning Use Cases for Smart Manufacturing KPIs. *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2019*, 4375–4380. <https://doi.org/10.1109/BigData47090.2019.9006539>
- Kovács, B. (2022). Scalable ML Methods to Optimize KPIs in Real-World Manufacturing Processes. *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence*, d, 5857–5858. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2022/831>
- Levkovskiy, B., Hinrichs, M., Betzwieser, B., & Utesch, M. C. (2021). Companies in transition: Understanding how the digital transformation affects business processes and their key performance indicators. *27th Annual Americas Conference on Information Systems 2021*, 0–10.
- Marinagi, C., Reklitis, P., Trivellas, P., & Sakas, D. (2023). The impact of industry 4.0 technologies on key performance indicators for a resilient supply chain 4.0. In *Sustainability*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/6/5185>
- Panchal, G., Clegg, B., Koupaei, E. E., Masi, D., & ... (2024). Digital transformation and business intelligence for a SME: systems thinking action research using ProOH modelling. *Procedia Computer ...* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050924001807>
- Pepe, C., & Zanolì, S. M. (2024). Digitalization, Industry 4.0, Data, KPIs, Modelization and Forecast for Energy Production in Hydroelectric Power Plants: A Review. In *Energies*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/4/941>
- Pour, P. D., Ahmed, A. A., Nazzal, M. A., & Darras, B. M. (2023). An industry 4.0 technology selection framework for manufacturing systems and firms using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods. In *Systems*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2079-8954/11/4/192>
- Priatna, D. K., Roswinna, W., Limakrisna, N., & ... (2025). Optimizing Smart Manufacturing Processes and Human Resource Management through Machine Learning Algorithms. ... *Journal of Industrial ...* <https://ijiemjournal.uns.ac.rs/index.php/ijiem/article/view/1529>
- Schumacher, A., & Sihn, W. (2020). Development of a monitoring system for implementation of industrial digitalization and automation using 143 key performance indicators. *Procedia CIRP*, 93(March), 1310–1315. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.012>
- Şener, U., Gökalp, E., & Eren, P. E. (2022). Intelligent digital transformation strategy management: Development of a measurement framework. ... *Systems in Digital Transformation ...* https://doi.org/10.1007/978-3-031-16598-6_4
- Siedler, C., Langlotz, P., & Aurich, J. C. (2020). Modeling and assessing the effects of digital technologies on KPIs in manufacturing systems. *Procedia CIRP*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120305394>
- Sishi, M., & Telukdarie, A. (2023). *Digital Technologies and Artificial Intelligence for Optimized Key Performance Indicators*. *MI*, 58–68. <https://doi.org/10.46254/sa02.20210032>
- Somohano-Rodríguez, F. M., & Madrid-Guijarro, A. (2022). Do industry 4.0 technologies improve Cantabrian manufacturing smes performance? The role played by industry competition. *Technology in Society*, 70(June), 102019. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102019>
- Sufian, A. T., Abdullah, B. M., & Miller, O. J. (2025). Smart Manufacturing Application in Precision Manufacturing. In *Applied Sciences*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/2/915>
- Tambare, P., Meshram, C., Lee, C. C., Ramteke, R. J., & ... (2021). Performance measurement system and quality management in data-driven Industry 4.0: A review. In *Sensors*. mdpi.com. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/224>
- Tambare, P., Meshram, C., Lee, C. C., Ramteke, R. J., & Imoize, A. L. (2022). Performance measurement system and quality management in data-driven industry 4.0: A review. *Sensors*, 22(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/s22010224>
- Taouab, O., & Issor, Z. (2019). Firm Performance: Definition and Measurement Models. *European Scientific Journal ESJ*, 15(1), 93–106. <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n1p93>
- Trubetskaya, A., Ryan, A., & Murphy, F. (2023). An implementation model for digitisation of visual management to develop a smart manufacturing process. *International Journal of Lean Six Sigma*, 15(8), 32–49. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-07-2022-0156>
- Žižek, S. Š., Nedelko, Z., Mulej, M., & Čič, Ž. V. (2020). Key performance indicators and industry 4.0—A socially responsible perspective. In *Naše gospodarstvo/Our ...*. sciendo.com. <https://doi.org/10.2478/ngoe-2020-0015>