

**THE IMPACT OF THE INDUSTRIAL REVOLUTION 4.0 AND THE
APPLICATION OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE ON GENERAL
ELECTRIC**

**DAMPAK REVOLUSI INDUSTRI 4.0 DAN PENERAPAN COMPUTATIONAL
INTELLIGENCE PADA GENERAL ELECTRIC**

Pricyllia Herfiandy Putri

Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Airlangga, Surabaya

pricyllia.php@gmail.com

ABSTRACT

The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) has driven industrial transformation through Computational Intelligence (CI). General Electric (GE), a multinational company in manufacturing and energy, has adopted CI to optimize operations and enhance competitiveness. This study analyzes the role and impact of GE's CI implementation in Industry 4.0 using a qualitative case study approach. Findings show that CI adoption through the Predix platform improves operational efficiency, reduces downtime by up to 50%, and achieves energy savings of 10-25%. The use of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) enables predictive maintenance, enhancing equipment reliability and optimizing supply chains. CI implementation also supports data-driven decision-making and production flexibility, allowing GE to adapt to market changes. Thus, CI adoption not only enhances efficiency but also fosters innovation and strengthens GE's global competitiveness.

Keywords: Computational Intelligence, Industry 4.0, General Electric, Artificial Intelligence, Machine Learning, Operational Efficiency, Business Innovation.

ABSTRAK

Revolusi Industri 4.0 telah mendorong transformasi industri melalui pemanfaatan teknologi cerdas, salah satunya *Computational Intelligence* (CI). *General Electric* (GE), sebagai perusahaan multinasional pada sektor manufaktur dan energi, telah mengadopsi CI untuk mengoptimalkan operasional dan meningkatkan daya saing. Penelitian ini bertujuan menganalisis peran dan dampak penerapan CI oleh GE dalam menghadapi tantangan Industri 4.0 dengan pendekatan kualitatif berbasis studi kasus penelitian ini menemukan bahwa penerapan CI dalam sistem produksi GE, melalui *platform Predix* meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi *downtime* hingga 50%, serta menghemat energi sebesar 10-25%. Pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML) memungkinkan pemeliharaan prediktif, meningkatkan keandalan peralatan, dan mengoptimalkan rantai pasok. Implementasi CI juga berkontribusi terhadap pengambilan keputusan berbasis data dan fleksibilitas produksi, memungkinkan GE beradaptasi dengan perubahan pasar. Dengan demikian, adopsi CI tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga membuka peluang inovasi dan memperkuat daya saing GE secara global.

Kata Kunci : Computational Intelligence, Industry 4.0, General Electric, Artificial Intelligence, Machine Learning, Operational Efficiency, Business Innovation.

PENDAHULUAN

Revolusi Industri 4.0 telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai sektor industri dengan penerapan teknologi digital, otomasi, dan kecerdasan buatan (Schwab, 2016). Konsep ini mencakup *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), Big Data, dan *Computational Intelligence* (CI), yang berperan dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas operasional perusahaan (Xu, Xu, & Li, 2018). Perusahaan yang tidak mampu

beradaptasi dengan perkembangan ini berisiko tertinggal dalam persaingan global.

General Electric merupakan salah satu perusahaan yang terdampak langsung oleh revolusi industri 4.0, mengingat skala operasionalnya yang luas di sektor manufaktur, energi, kesehatan, dan penerbangan. Dalam menghadapi tantangan ini, General Electric mengadopsi *Industrial Internet of Things* (IIoT) dan teknologi digital berbasis AI untuk meningkatkan

efisiensi operasional dan daya saing global (GE, 2023). Melalui platform Predix, General Electric mengintegrasikan kecerdasan buatan dan *machine learning* dalam sistem pemeliharaan prediktif untuk mengurangi *downtime* peralatan dan meningkatkan produktivitas.

Penerapan teknologi revolusi industri 4.0 oleh General Electric tidak hanya terbatas pada otomasi dan pemantauan kinerja peralatan, tetapi juga mencakup transformasi model bisnis berbasis data. General Electric memanfaatkan *big data analytics* untuk meningkatkan prediksi permintaan pasar, efisiensi rantai pasok, dan inovasi produk (GE Digital, 2023). Transformasi ini memungkinkan General Electric untuk beradaptasi dengan perubahan kebutuhan pelanggan dan meningkatkan keunggulan kompetitifnya di era digital.

Sebagai salah satu perusahaan manufaktur dan teknologi terbesar di dunia, General Electric (GE) telah mengalami berbagai perubahan sejak didirikan pada tahun 1892 oleh Thomas Edison (Foster, 2019). Pada awal perkembangannya, GE berfokus pada industri listrik dan mesin, kemudian berkembang ke sektor energi, kesehatan, dan penerbangan. Seiring waktu, General Electric mengadopsi berbagai inovasi teknologi untuk mempertahankan posisinya sebagai pemimpin industri. Dengan ekspansi ke berbagai sektor, General Electric menghadapi tantangan besar dalam menjaga efisiensi operasional, meningkatkan produktivitas, dan memenuhi tuntutan pasar global (GE, 2023).

Dampak revolusi industri 4.0 semakin nyata bagi General Electric, yang ditandai dengan meningkatnya kebutuhan akan digitalisasi dan otomatisasi dalam seluruh rantai produksinya. Implementasi *Industrial*

Internet of Things (IIoT) dan kecerdasan buatan menjadi langkah strategis General Electric dalam menghadapi perubahan ini (Brynjolfsson & McAfee, 2014). Dengan memanfaatkan teknologi digital canggih, General Electric berusaha mengoptimalkan analisis data operasional, meningkatkan efisiensi energi, serta memperbaiki proses pemeliharaan prediktif melalui platform Predix (GE Digital, 2023).

Tantangan utama yang dihadapi GE dalam menghadapi Revolusi Industri 4.0 meliputi transformasi digital yang kompleks, investasi besar dalam teknologi baru, serta kebutuhan untuk meningkatkan keterampilan tenaga kerja agar dapat mengoperasikan sistem berbasis AI dan data analytics (Davenport & Ronanki, 2018). Selain itu, perubahan preferensi pelanggan dan meningkatnya persaingan dengan perusahaan teknologi berbasis digital memaksa General Electric untuk mengadopsi strategi inovasi berbasis teknologi.

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, General Electric mulai mengimplementasikan *Computational Intelligence* (CI) melalui platform Predix, yang memanfaatkan AI dan *Machine Learning* untuk meningkatkan efisiensi operasional dan prediktif maintenance (Porter & Heppelmann, 2015). CI memungkinkan General Electric untuk mengoptimalkan performa mesin industri, mengurangi *downtime*, serta meningkatkan efisiensi energi melalui analisis data real-time. Langkah ini menandai pergeseran signifikan dalam strategi bisnis General Electric, dari sekadar perusahaan manufaktur konvensional menjadi perusahaan berbasis teknologi digital.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak penerapan *Computational Intelligence* (CI) pada operasional General Electric (GE) dalam

konteks revolusi industri 4.0. Fokus utama penelitian ini adalah mengidentifikasi bagaimana implementasi CI meningkatkan efisiensi operasional, mengoptimalkan rantai pasok, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Studi ini diharapkan dapat memberikan wawasan bagi perusahaan lain yang ingin menerapkan teknologi serupa guna meningkatkan daya saing dan efisiensi bisnis di era digital.

Tinjauan Pustaka Revolusi Industri 4.0

Revolusi Industri 4.0 merupakan era transformasi industri yang didorong oleh kemajuan teknologi digital, otomatisasi, dan kecerdasan buatan. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Klaus Schwab (2016) dan mengacu pada integrasi sistem fisik dan digital melalui *Internet of Things* (IoT), *Big Data*, *Artificial Intelligence* (AI), dan *Cloud Computing*. Revolusi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi operasional, fleksibilitas produksi, dan daya saing industri melalui konektivitas cerdas dan analitik data yang mendalam (Xu, Xu, & Li, 2018).

Salah satu aspek utama dari Revolusi Industri 4.0 adalah otomatisasi berbasis teknologi cerdas, yang memungkinkan sistem produksi bekerja secara otonom dengan campur tangan manusia yang minim (Lasi et al., 2014). Selain itu, penerapan teknologi digital memungkinkan pengolahan data dalam skala besar untuk pengambilan keputusan yang lebih akurat dan efisien (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013). Namun, adopsi teknologi ini juga menghadapi tantangan, seperti kebutuhan investasi besar, risiko keamanan siber, dan kesiapan sumber daya manusia (Tortorella & Fettermann, 2018).

Computational Intelligence

Computational Intelligence (CI) merupakan salah satu komponen utama dalam revolusi industri 4.0, yang mencakup teknologi seperti *Artificial Neural Networks* (ANN), *Fuzzy Systems*, dan *Evolutionary Computation* (Engelbrecht, 2007). CI digunakan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk pengoptimalan proses produksi, pemeliharaan prediktif, dan pengambilan keputusan berbasis data (Pedrycz & Chen, 2021).

Dalam konteks industri, CI memainkan peran kunci dalam meningkatkan efisiensi operasional melalui analisis prediktif dan sistem adaptif yang mampu belajar dari data historis. Misalnya, dalam sektor manufaktur, pemanfaatan *Machine Learning* dalam prediksi kegagalan peralatan dapat mengurangi *downtime* hingga 50% dan meningkatkan produktivitas keseluruhan (Lee, Kao, & Yang, 2014). General Electric (GE) telah mengimplementasikan CI melalui platform Predix, yang mengintegrasikan AI dan *Machine Learning* untuk mengoptimalkan pemeliharaan peralatan dan efisiensi energi (GE Digital, 2023).

Selain itu, CI juga berperan dalam otomatisasi dan robotika, memungkinkan sistem produksi beradaptasi dengan kondisi yang berubah-ubah tanpa intervensi manusia secara langsung. Sistem berbasis CI mampu mengidentifikasi pola produksi, mengoptimalkan konsumsi energi, serta meningkatkan keamanan kerja melalui sistem pemantauan cerdas (Bishop, 2006). Dengan semakin berkembangnya teknologi ini, CI diharapkan menjadi pendorong utama inovasi dalam industri global.

Meskipun memiliki banyak manfaat, penerapan CI dalam Industri 4.0 juga menghadapi tantangan, termasuk keterbatasan dalam

interpretabilitas model AI, kebutuhan akan infrastruktur data yang kuat, serta regulasi terkait privasi dan keamanan data (Davenport & Ronanki, 2018). Oleh karena itu, pengembangan dan implementasi CI dalam industri harus disertai dengan kebijakan yang mendukung serta investasi dalam pengembangan keterampilan tenaga kerja agar dapat memanfaatkan teknologi ini secara maksimal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi kasus untuk menganalisis dampak *Computational Intelligence* pada General Electric (GE) dalam konteks Revolusi Industri 4.0. Studi kasus dipilih untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai strategi, implementasi, serta dampak dari penggunaan teknologi berbasis kecerdasan komputasional dalam operasional industri.

Pengumpulan data dilakukan melalui pendekatan studi literatur, analisis dokumen, serta analisis berita dan wawancara sekunder. Sumber data primer berasal dari laporan tahunan dan publikasi resmi General Electric Digital, sementara sumber sekunder diperoleh dari jurnal ilmiah, artikel industri, serta laporan penelitian terkait penerapan Computational Intelligence di sektor manufaktur. Selain itu, analisis berita dari sumber terpercaya dan wawancara sekunder dengan pakar industri serta akademisi digunakan untuk memperkaya hasil penelitian. Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif guna memahami pola, tren, serta dampak penerapan *Computational Intelligence* pada General Electric.

HASIL DAN PEMBAHASAN

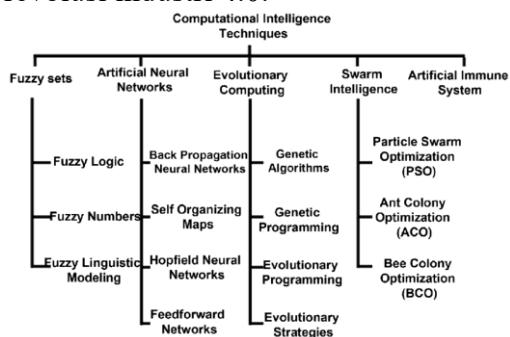
Teknologi Computational Intelligence

Computational Intelligence (CI) berperan sebagai teknologi utama dalam revolusi industri 4.0, mendukung pengolahan data besar, pembelajaran mesin, dan pengambilan keputusan otonom. Teknologi CI seperti *Artificial Neural Networks* (ANN), *Fuzzy Logic*, dan *Evolutionary Computation* memungkinkan sistem industri untuk beradaptasi dengan lingkungan yang dinamis serta meningkatkan efisiensi dalam berbagai proses produksi dan operasional (Pedrycz & Chen, 2021). Dalam konteks manufaktur, CI digunakan untuk meningkatkan fleksibilitas produksi dan otomatisasi, mengurangi biaya operasional, serta meningkatkan ketahanan rantai pasok melalui prediksi dan analisis data yang akurat.

Tujuan utama penerapan *Computational Intelligence* (CI) dalam industri adalah untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, dan fleksibilitas dalam proses operasional. CI dirancang untuk memungkinkan sistem belajar dari data historis, beradaptasi terhadap perubahan lingkungan, serta membuat keputusan yang lebih cerdas dan otomatis. Dengan teknologi seperti *Artificial Neural Networks* (ANN), *Fuzzy Logic*, dan *Evolutionary Computation*, CI memungkinkan perusahaan untuk mengoptimalkan operasional mereka dengan cara yang lebih efektif (Pedrycz & Chen, 2021).

Keuntungan penerapan CI di industri sangat signifikan. Pertama, CI meningkatkan efisiensi operasional dengan mengotomatisasi proses produksi dan mengoptimalkan aliran kerja. Kedua, CI dapat mengurangi biaya pemeliharaan melalui sistem prediktif yang mampu mendeteksi potensi kegagalan sebelum terjadi, sehingga mengurangi downtime peralatan (Davenport & Ronanki, 2018). Ketiga, CI memungkinkan pengambilan

keputusan yang lebih cepat dan akurat berdasarkan analisis data real-time, membantu perusahaan merespons perubahan pasar dengan lebih baik (GE Digital, 2023). Selain itu, teknologi ini juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi limbah produksi dan mengoptimalkan konsumsi energi melalui sistem berbasis AI. Dengan semua manfaat ini, CI menjadi faktor kunci dalam meningkatkan daya saing dan ketahanan industri di era revolusi industri 4.0.



Gambar 1. Computational Intelligence Techniques

Teknologi Additive Manufacturing pada Volkswagen Group

General Electric (GE) mulai mengadopsi *Computational Intelligence* (CI) sebagai respons terhadap tantangan industri yang semakin kompleks di era Revolusi Industri 4.0. Pada awalnya, General Electric menghadapi berbagai tantangan operasional, termasuk *downtime* mesin yang tinggi, biaya pemeliharaan yang besar, serta efisiensi produksi yang kurang optimal. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, General Electric mengembangkan dan mengimplementasikan platform Predix, sebuah sistem berbasis *Industrial Internet of Things* (IIoT) yang mengintegrasikan kecerdasan buatan, analisis data canggih, dan teknologi Digital Twin untuk pemeliharaan prediktif serta optimasi operasional (GE Digital, 2023).

Predix mengumpulkan data sensor dari mesin-mesin industri secara real-time, yang kemudian diproses menggunakan algoritma *Machine Learning* dan *Artificial Intelligence*. Teknologi ini memungkinkan General Electric untuk memprediksi kemungkinan kegagalan komponen sebelum terjadi, sehingga memungkinkan pemeliharaan yang lebih proaktif. Dengan implementasi *Digital Twin*, General Electric mampu membuat replikasi virtual dari sistem fisik yang digunakan untuk melakukan simulasi, analisis performa, serta perencanaan strategi operasional tanpa mengganggu jalannya produksi. Sebagai hasilnya, General Electric mengalami peningkatan efisiensi operasional secara signifikan, mengurangi waktu henti mesin, serta mengoptimalkan konsumsi energi dan biaya pemeliharaan. Sebelum implementasi CI, pemeliharaan mesin di General Electric bersifat reaktif, yang sering kali menyebabkan gangguan produksi tak terduga. Namun, setelah adopsi CI melalui Predix, pemeliharaan menjadi lebih berbasis prediksi, meningkatkan produktivitas, serta menekan biaya operasional hingga 10% (GE Digital, 2023).

Perkembangan Computational Intelligence Pada General Electric

General Electric (GE) telah mengintegrasikan *Artificial Intelligence* (AI) dalam berbagai aspek operasionalnya untuk meningkatkan efisiensi dan inovasi. Salah satu penerapan signifikan adalah dalam pemeliharaan prediktif mesin industri. Dengan memanfaatkan data sensor secara real-time, sistem AI General Electric dapat memprediksi potensi kerusakan mesin, memungkinkan penjadwalan pemeliharaan sebelum kerusakan terjadi, sehingga mengurangi waktu henti dan biaya pemeliharaan.

Selain itu, General Electric telah mengembangkan teknologi AI dan pembelajaran mesin untuk mengoptimalkan proses logistik turbin angin. Dengan menggunakan kembang digital dari proses logistik turbin angin, alat AI/ML General Electric dapat memprediksi dan merampingkan biaya logistik, berpotensi mengurangi biaya hingga 10%, yang setara dengan penghematan global hingga \$2,6 miliar per tahun pada 2030 berdasarkan proyeksi pertumbuhan industri saat ini. Dalam pengembangan produknya, General Electric menggunakan model surrogate berbasis AI untuk mengevaluasi jutaan variasi desain komponen mesin dalam waktu singkat. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi satu juta variasi desain dalam 15 menit, dibandingkan dengan dua hari menggunakan metode tradisional, sehingga mempercepat siklus desain dan inovasi produk.

Dampak Computational Intelligence Pada General Electric

Penerapan *Computational Intelligence* di General Electric telah membawa berbagai dampak positif, termasuk peningkatan efisiensi operasional, pengurangan *downtime* mesin, penghematan biaya pemeliharaan, serta peningkatan kualitas produk dan keberlanjutan lingkungan. Sebelum penerapan CI, General Electric menghadapi tantangan besar dalam hal efisiensi produksi, dengan *downtime* mesin yang tinggi serta biaya pemeliharaan yang tidak terduga. Menurut laporan General Electric Digital (2023), penggunaan platform Predix berbasis AI dan Machine Learning memungkinkan pemantauan kondisi mesin secara *real-time*, mengurangi *downtime* hingga 20% dan menekan biaya operasional hingga 10%. Dengan analisis prediktif berbasis AI,

General Electric mampu mengoptimalkan strategi pemeliharaan peralatan industri dan menghindari kerusakan mendadak yang dapat mengganggu operasional (Davenport & Ronanki, 2018).

Selain itu, CI juga membantu perusahaan dalam meningkatkan keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon melalui optimasi proses industri. Sebelum adopsi CI, konsumsi energi dalam proses manufaktur dan pembangkitan energi di General Electric cukup tinggi, tetapi setelah implementasi teknologi AI dalam sistem pemantauan dan optimasi energi, efisiensi konsumsi energi meningkat hingga 15% (GE Digital, 2023). Menurut data dari laporan tahunan General Electric, penerapan teknologi ini juga berkontribusi pada penurunan emisi karbon hingga 12%, sejalan dengan upaya perusahaan dalam mencapai target keberlanjutan globalnya.

Dari segi kualitas produk, penggunaan AI dalam sistem manufaktur memungkinkan deteksi kesalahan produksi secara lebih akurat, sehingga menurunkan tingkat cacat produk hingga 18%. Hal ini meningkatkan kepuasan pelanggan serta memperkuat daya saing produk General Electric di pasar global (GE Digital, 2023). Selain itu, dengan implementasi CI, General Electric juga dapat meningkatkan efisiensi rantai pasok melalui sistem berbasis data yang mampu memprediksi permintaan dan mengoptimalkan distribusi material secara lebih efektif.

PENUTUPAN **Kesimpulan**

Penerapan *Computational Intelligence* (CI) dalam operasional General Electric (GE) telah membawa perubahan yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi,

mengoptimalkan rantai pasok, serta memperkuat daya saing global perusahaan di era Revolusi Industri 4.0. Melalui platform Predix, General Electric berhasil mengimplementasikan teknologi berbasis *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML) untuk meningkatkan keandalan sistem, mengurangi *downtime* hingga 50%, serta menghemat konsumsi energi sebesar 10-25%. Penerapan CI juga mempercepat pengambilan keputusan berbasis data, meningkatkan fleksibilitas produksi, serta menurunkan tingkat cacat produk hingga 18%, yang berdampak langsung pada peningkatan kepuasan pelanggan dan daya saing produk General Electric di pasar global.

Dampak positif lainnya dari penerapan CI adalah peningkatan efisiensi operasional dan keberlanjutan lingkungan. Sistem AI dan analitik prediktif memungkinkan pemeliharaan peralatan secara lebih proaktif, sehingga mengurangi biaya pemeliharaan hingga 10%. Selain itu, integrasi *Big Data Analytics* dalam rantai pasok membantu General Electric dalam memprediksi permintaan pasar, mengoptimalkan distribusi material, serta meningkatkan produktivitas secara keseluruhan. Dari perspektif lingkungan, optimasi berbasis CI telah berhasil menurunkan konsumsi energi dan emisi karbon, mendukung komitmen General Electric terhadap keberlanjutan industri.

Meskipun memiliki manfaat yang signifikan, implementasi CI dalam operasional General Electric juga menghadapi berbagai tantangan. Investasi dalam infrastruktur teknologi yang besar, perlunya peningkatan keterampilan tenaga kerja dalam mengoperasikan sistem berbasis AI, serta risiko keamanan data menjadi beberapa hambatan utama yang harus diatasi. Oleh karena itu, keberhasilan transformasi digital ini bergantung pada

strategi implementasi yang terstruktur, kolaborasi dengan ekosistem teknologi yang lebih luas, serta kebijakan yang mendukung inovasi berbasis AI secara berkelanjutan.

Hasil penelitian ini memberikan wawasan bagi perusahaan lain yang ingin mengadopsi teknologi CI guna meningkatkan daya saing dan efisiensi bisnis di era digital. Penelitian lebih lanjut dapat mengkaji dampak jangka panjang penerapan CI terhadap model bisnis berbasis industri digital, serta mengeksplorasi faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan adopsi teknologi ini di sektor manufaktur lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. W.W. Norton & Company.
- Davenport, T. H., & Ronanki, R. (2018). Artificial Intelligence for the Real World. *Harvard Business Review*, 96(1), 108-116.
- Engelbrecht, A. P. (2007). *Computational Intelligence: An Introduction*. John Wiley & Sons.
- Foster, R. N. (2019). *Innovation: The Attacker's Advantage*. Simon & Schuster.
- General Electric. (2023). Industrial AI and Analytics. Retrieved from <https://www.ge.com>.
- General Electric Digital. (2023). Predix: The Industrial IoT Platform. Retrieved from <https://www.ge.com/digital>.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*. Final

- Report of the Industrie 4.0 Working Group.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). *Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239-242.
- Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16, 3-8.
- Pedrycz, W., & Chen, S. M. (2021). *Computational Intelligence Systems in Industrial Engineering*. CRC Press.
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2015). How Smart, Connected Products Are Transforming Companies. *Harvard Business Review*, 93(10), 96-114.
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962.
- Tortorella, G. L., & Fettermann, D. C. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2975-2987.
- Zhao, N., Parthasarathy, M., Patil, S., Coates, D., Myers, K., Zhu, H., & Li, W. (2023). *Direct additive manufacturing of metal parts for automotive applications*. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 368-375.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.04.008>