

TINJAUAN INTEGRASI TEKNOLOGI DEEP LEARNING UNTUK REVOLUSI INDUSTRI DALAM SISTEM SIBER- FISIK

RIFKI FAHRIAL ZAINAL^[1], SYARIFUL ALIM^[2], ARIF ARIZAL^[3], RANGSANG PURNAMA^[4]

^{[1],[2],[3],[4]}Teknik Informatika, Universitas Bhayangkara Surabaya

Jl. Ahmad Yani No. 114 Surabaya 60231

e-mail: ^[1]rifki@ubhara.ac.id, ^[2]syarifulalim99@gmail.com, ^[3]qariff@gmail.com,

^[4]rangsangpurnama@ubhara.ac.id

ABSTRACT

An important development in industrial automation is the combination of deep learning with cyber-physical systems (CPS), which allows systems to make data-driven, intelligent decisions with little assistance from humans. With an emphasis on its capacity to handle massive amounts of data for tasks including object detection, semantic segmentation, predictive maintenance, and autonomous control, this research investigates the revolutionary effects of deep learning on CPS. It looks at how technology has developed from early frameworks that relied on visual cues to complex systems that use cutting-edge neural networks that can function in dynamic, unstructured contexts. The study also emphasizes how important it is to integrate ethical frameworks, organizational preparedness, and human-centered design in order to successfully implement CPS. This study analyzes important trends, obstacles, and best practices that influence the application of deep learning in CPS through an extensive examination of recent literature. The significance of CPS in facilitating the Industry 4.0 and Industry 5.0 paradigms—which prioritize sustainability, human-machine collaboration, and real-time adaptation in industrial processes—is given particular attention.

Keywords: Deep Learning, Cyber-Physical Systems, Industry 4.0, Industry 5.0, Human-Centered Design, Smart Manufacturing, Automation, Ethical AI

ABSTRAK

Perkembangan penting dalam otomasi industri adalah kombinasi pembelajaran mendalam dengan sistem siber-fisik (CPS), yang memungkinkan sistem membuat keputusan cerdas berbasis data dengan sedikit bantuan dari manusia. Dengan penekanan pada kapasitasnya untuk menangani sejumlah besar data untuk berbagai tugas termasuk deteksi objek, segmentasi semantik, pemeliharaan prediktif, dan kontrol otonom, penelitian ini menyelidiki efek revolusioner pembelajaran mendalam pada CPS. Penelitian ini melihat bagaimana teknologi telah berkembang dari kerangka kerja awal yang mengandalkan isyarat visual menjadi sistem kompleks yang menggunakan jaringan saraf mutakhir yang dapat berfungsi dalam konteks yang dinamis dan tidak terstruktur. Studi ini juga menekankan betapa pentingnya mengintegrasikan kerangka kerja etika, kesiapan organisasi, dan desain yang berpusat pada manusia untuk berhasil menerapkan CPS. Studi ini menganalisis tren penting, hambatan, dan praktik terbaik yang memengaruhi penerapan pembelajaran mendalam dalam CPS melalui pemeriksaan ekstensif literatur terkini. Signifikansi CPS dalam memfasilitasi paradigma Industri 4.0 dan Industri 5.0—yang memprioritaskan keberlanjutan, kolaborasi manusia-mesin, dan adaptasi waktu nyata dalam proses industri—diberi perhatian khusus.

Kata kunci: Deep Learning, Sistem Siber-Fisik, Industri 4.0, Industri 5.0, Desain Berpusat pada Manusia, Manufaktur Cerdas, Otomasi, Ethical AI

1. PENDAHULUAN

Penggabungan *deep learning* ke dalam sistem siber-fisik mengubah proses industri dan membuka pintu bagi lebih banyak otomatisasi, pengambilan keputusan instan, dan peningkatan produktivitas (Maru et al., 2022). Komponen teknologi penting seperti komunikasi dan keamanan siber memungkinkan konvergensi aset fisik, kembaran digitalnya, dan aplikasi industri, yang dikenal sebagai sistem siber-fisik (Hoffmann et al., 2021). Konvergensi ini menciptakan sistem cerdas yang dapat mengoptimalkan kinerja dan beradaptasi dengan lingkungan yang berubah dengan memanfaatkan analisis data, layanan cloud, dan robotika canggih (Colombathanthri et al., 2025; Jamwal et al., 2020). Dengan memungkinkan mereka belajar dari data dalam jumlah besar, mengidentifikasi pola, dan membuat prediksi dengan presisi yang mencengangkan, *deep learning*—bagian dari kecerdasan buatan—semakin meningkatkan kemampuan CPS (Wan et al., 2020). Mengingat fokus pada manufaktur cerdas, kolaborasi manusia-mesin, dan praktik berkelanjutan dalam konteks revolusi industri keempat dan kelima, sinergi antara *deep learning* dan CPS ini sangat penting (Colombathanthri et al., 2025).

Telah terjadi inovasi dan perbaikan yang konstan selama proses penggabungan *deep learning* ke dalam CPS untuk aplikasi industri. Seperti yang terlihat dari terciptanya kerangka kerja CPS berbasis *deep learning* untuk manipulasi lengan robot, upaya awal difokuskan pada penggunaan *deep learning* untuk tugas-tugas termasuk deteksi objek dan kontrol waktu nyata (Maru et al., 2022). Meskipun memiliki kekurangan dalam hal kecepatan pemrosesan dan ketergantungan pada isyarat visual, studi awal ini menunjukkan kemungkinan penggunaan *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk memproses data visual dan mengarahkan tindakan robot. Untuk mengatasi kendala ini dan memungkinkan persepsi yang lebih andal dan efektif dalam CPS, studi selanjutnya menyelidiki metode *deep learning* yang semakin kompleks, seperti segmentasi semantik visual (Piardi et al., 2024). Lebih jauh lagi, strategi komprehensif yang memperhitungkan tidak hanya komponen teknologi tetapi juga variabel organisasi dan manusia yang terlibat diperlukan untuk keberhasilan integrasi *deep learning* ke dalam CPS. Untuk menjamin bahwa sistem ini efisien dan sejalan dengan nilai-nilai kemanusiaan, hal ini memerlukan penanganan hambatan implementasi seperti persyaratan untuk teknik manajemen perubahan serta mengintegrasikan tindakan pencegahan keselamatan, pertimbangan etika, dan prinsip desain yang berpusat pada manusia (Mohdhar & Shaalan, 2021). Agar CPS yang ditingkatkan dengan *deep learning* mencapai potensi penuhnya dalam konteks revolusi industri yang terus berubah, semua komponen harus bersatu.

2. PENGEMBANGAN DEEP LEARNING DALAM SISTEM SIBER-FISIK

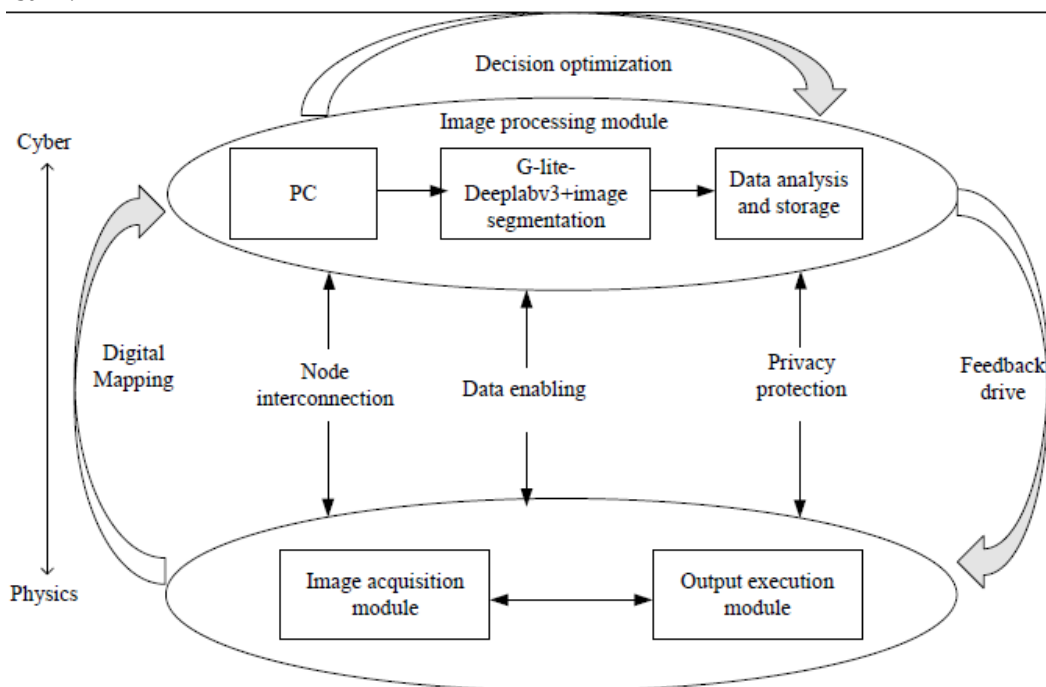
Meningkatkan kemampuan sistem robotik dengan panduan visual waktu nyata merupakan tujuan utama dari investigasi pertama *deep learning* dalam CPS untuk aplikasi industri (Maru et al., 2022). Penciptaan kerangka kerja berbasis *deep learning* untuk memanipulasi lengan robot dengan isyarat visual yang diambil dari kartu merupakan salah satu contoh penting (Rai & Sahu, 2020). Bentuk dari lengan robot dan kartu visual tersebut dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Lengan Robot dan Kartu Visual Pengendalinya

Metode ini memungkinkan lengan robot untuk melaksanakan tugas-tugas tertentu berdasarkan isyarat yang terdeteksi dengan melatih jaringan saraf konvolusional untuk mengenali dan memahami informasi visual yang ditampilkan pada kartu. Studi ini membuka pintu bagi otomatisasi dan aplikasi industri yang lebih kompleks dengan membuktikan bahwa pembelajaran mendalam dapat digunakan untuk memberi robot kemampuan berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya dengan cara yang lebih cerdas dan mudah beradaptasi. Potensi *Deep Learning* dalam CPS ditunjukkan oleh implementasi awal ini, tetapi juga mengungkap beberapa kelemahan. Kemampuan beradaptasi sistem dibatasi oleh ketergantungannya pada pengenalan visual, seperti kartu, yang menciptakan kebutuhan pada lingkungan yang terkendali. Lebih jauh, kinerja waktu nyata terhambat oleh waktu pemrosesan yang dibutuhkan untuk deteksi objek dan pengenalan gambar, terutama dalam lingkungan industri yang dinamis. Pembatasan ini mendorong penyelidikan tambahan ke dalam metode pembelajaran mendalam yang lebih canggih yang mungkin dapat mengatasinya dan memungkinkan CPS yang lebih andal dan efektif.

Penelitian selanjutnya difokuskan pada pengintegrasian segmentasi semantik visual ke dalam CPS untuk meningkatkan persepsi dan pengenalan objek guna mengatasi kelemahan metode berbasis penanda. Metode *deep learning* yang disebut segmentasi semantik visual mengklasifikasikan setiap piksel dalam gambar, sehingga mesin memperoleh pemahaman yang lebih rinci tentang pemandangan tersebut. Bahkan dalam lingkungan yang rumit dan padat, CPS dapat mengenali dan membedakan berbagai item dan area di dalam gambar dengan memanfaatkan teknologi ini. Untuk memperoleh segmentasi gambar kemasan produk yang lebih efektif, satu penelitian menggunakan jaringan segmentasi G-Lite-DeeplabV3+ ke dalam arsitektur CPS. Arsitektur CPS tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.

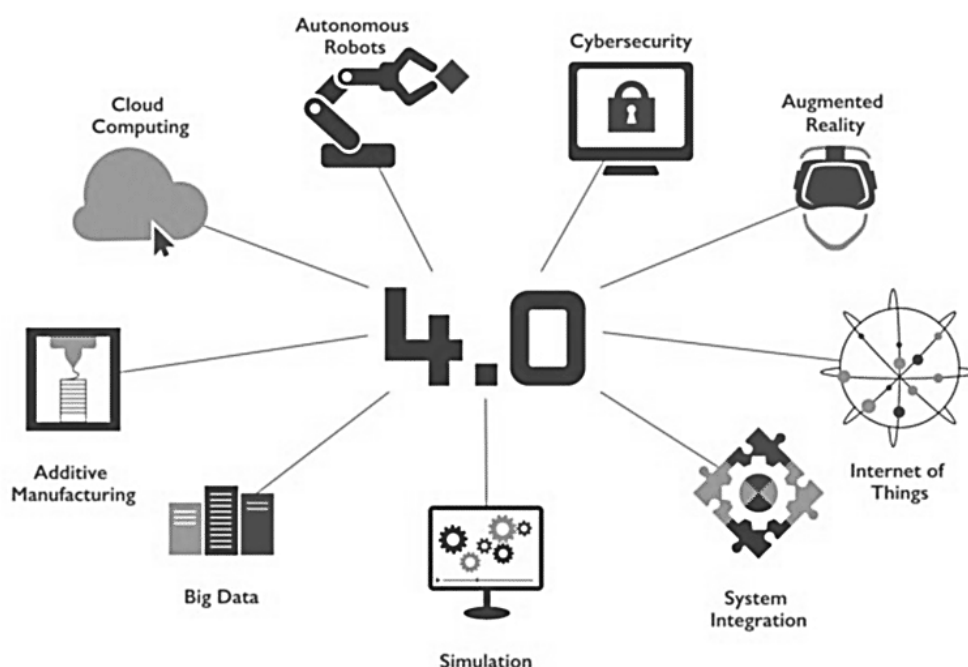


Gambar 2 Arsitektur CPS untuk Segmentasi Gambar

Metode ini menghasilkan sistem robotik yang lebih fleksibel dan adaptif dengan menghilangkan kebutuhan akan penanda visual dan memungkinkan sistem untuk segera menginterpretasikan informasi visual yang ditemukan di sekitarnya. Selain meningkatkan akurasi dan efisiensi pengenalan item, penggabungan segmentasi semantik visual ke dalam CPS menciptakan peluang baru untuk perakitan otomatis, deteksi cacat, dan kontrol kualitas. Efektivitas metode ini bergantung pada kapasitas model pembelajaran mendalam untuk mengelola kebisingan, tekstur yang

rumit, dan perubahan pencahayaan—yang semuanya merupakan masalah yang sering terjadi dalam pengaturan industri. Langkah pertama yang penting dalam mencapai potensi penuh CPS dalam otomatisasi dan manufaktur cerdas adalah pembuatan algoritma *deep learning* yang andal dan efektif untuk segmentasi semantik visual.

Agar berhasil menggabungkan *deep learning* ke dalam CPS, masalah organisasi dan manusia harus dipertimbangkan dengan saksama selain peningkatan teknologi. Karyawan dan pemangku kepentingan mungkin keberatan dengan penyesuaian besar yang harus dilakukan pada alur kerja, prosedur, dan keahlian saat ini untuk menerapkan teknologi ini. Oleh karena itu, untuk menjamin transfer yang berhasil dan lancar, teknik manajemen perubahan yang tepat sangat penting. Satu studi meneliti hambatan dalam mengintegrasikan teknologi Industri 4.0, seperti CPS, ke dalam manajemen teknik dan menggarisbawahi betapa pentingnya mengambil langkah proaktif untuk mengatasi hambatan ini. Ini memerlukan pemberian pelatihan dan bantuan yang tepat kepada anggota staf, mendorong budaya kolaboratif dan inovatif, dan menguraikan keuntungan dari teknologi baru dengan jelas pada setiap bagiannya seperti terlihat pada Gambar 3.

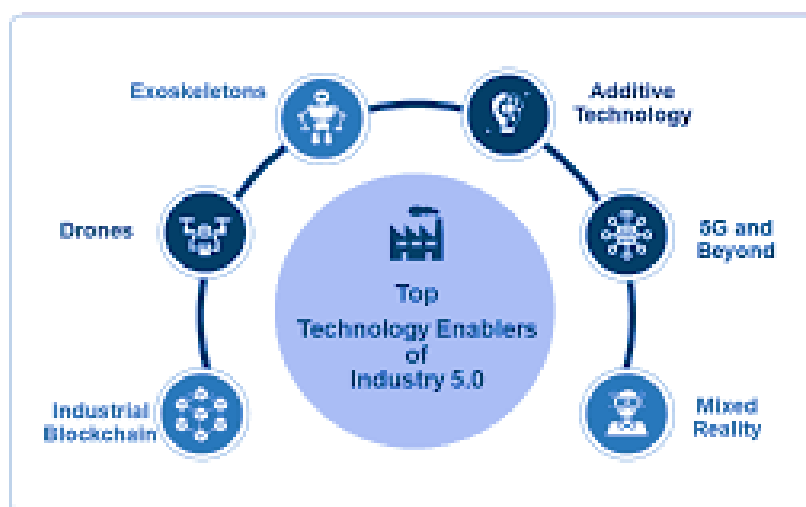


Gambar 3 Element Industri 4.0

Untuk menjamin bahwa keinginan dan perhatian mereka terpenuhi, penting juga untuk melibatkan anggota staf dalam proses desain dan implementasi. Lebih jauh, penting untuk menganalisis secara saksama konsekuensi etis dari penerapan CPS yang diperkuat oleh *deep learning*. Aturan dan perlindungan yang jelas harus diberlakukan karena sistem ini semakin mandiri dan mampu membuat penilaian untuk menghindari efek yang tidak terduga dan menjamin penggunaannya yang bertanggung jawab (Colombathanthri et al., 2025). Ini memerlukan penanganan masalah termasuk bias algoritmik, privasi data, dan kemungkinan efek pada pekerjaan. Akibatnya, strategi komprehensif yang mempertimbangkan elemen organisasi dan manusia selain elemen teknologi diperlukan untuk keberhasilan integrasi pembelajaran mendalam ke dalam CPS (Wang et al., 2015).

Sangat penting untuk mempertimbangkan faktor manusia dan memastikan bahwa sistem ini dibuat agar aman, menyenangkan, dan mudah digunakan karena CPS semakin banyak dimasukkan ke dalam proses industri. Menggabungkan keinginan, preferensi, dan nilai manusia ke dalam desain dan pelaksanaan sistem ini sangat penting, menurut gagasan CPS yang berpusat pada manusia

(Colombathanthri et al., 2025). Tinjauan sistematis CPS yang berpusat pada manusia di sektor manufaktur dilakukan oleh satu studi, yang menekankan pentingnya elemen-elemen termasuk ergonomi, beban kognitif, dan pengalaman pengguna. Sangat mungkin untuk mengembangkan CPS yang tidak hanya efektif dan produktif tetapi juga meningkatkan kesejahteraan dan kebahagiaan kerja karyawan dengan memberikan prioritas utama pada elemen manusia. Strategi ini sejalan dengan prinsip Industri 5.0, yang menekankan kerja sama manusia-mesin untuk membangun sistem industri yang lebih tangguh dan berkelanjutan (Pirvu et al., 2015). Pertimbangan etika harus mencakup keadilan, transparansi, dan penghormatan terhadap nilai-nilai kemanusiaan (Dhirani et al., 2023). Ini adalah landasan untuk memastikan teknologi digunakan secara bijaksana dan semua elemen mendapatkan manfaat darinya seperti terlihat pada Gambar 4 (Colombathanthri et al., 2025).



Gambar 4 Elemen Industri 5.0

Hal ini memerlukan penanganan berbagai masalah seperti bias algoritmik, privasi data, dan kemungkinan dampaknya terhadap ketenagakerjaan (Dignum, 2018). Oleh karena itu, strategi komprehensif yang mempertimbangkan variabel organisasi, etika, dan manusia selain variabel teknologi diperlukan untuk keberhasilan integrasi pembelajaran mendalam ke dalam CPS (Colombathanthri et al., 2025; Fantini et al., 2019; Maru et al., 2022). Selain itu, faktor keselamatan dan manusia ditingkatkan dengan menggabungkan biosensor canggih untuk penginderaan yang andal, aplikasi CPS pengontrol biofeedback di stasiun kerja yang rumit, dan algoritma penghindaran kontak dengan robot industri (Colombathanthri et al., 2025). Kehidupan banyak orang dapat ditingkatkan dan industri dapat ditransformasikan melalui integrasi ini (Ashibani & Mahmoud, 2017; Haque et al., 2014; Maru et al., 2022).

3. TEORI

Sistem siber-fisik, yang menggabungkan proses fisik dan kecerdasan komputasional untuk mencapai tingkat respons, efisiensi, dan fleksibilitas yang belum pernah ada sebelumnya, menandai lompatan paradigma dalam otomatisasi industri (Lun et al., 2018). Bidang studi yang sangat menarik adalah penggabungan teknologi *deep learning* ke dalam CPS, yang memungkinkan sistem ini untuk menjalankan tugas rumit seperti kontrol otonom, pemeliharaan prediktif, dan pengenalan objek dengan kecepatan dan akurasi yang luar biasa (Maru et al., 2022).

Potensi *deep learning* untuk mengubah banyak aspek proses industri telah dibuktikan dengan penggabungannya ke dalam CPS. Untuk aplikasi industri, satu proyek penelitian difokuskan pada pembuatan kerangka kerja CPS cerdas yang memanfaatkan identifikasi objek secara real-time, visi mesin, dan lengan robot kolaboratif (Maru et al., 2022). Dengan penggunaan algoritma *deep learning*

dan informasi visual dari kamera, pendekatan yang disarankan memungkinkan lengan robot untuk mengidentifikasi dan mengendalikan berbagai hal secara real-time. Dibandingkan dengan pemrograman robot konvensional yang dikodekan secara keras, metode ini lebih fleksibel dan adaptif, sehingga memungkinkan sistem untuk mengakomodasi perubahan ukuran, bentuk, dan orientasi objek. Robot berkomunikasi dengan komputer ITX kecil melalui pertukaran data secara real-time (Maru et al., 2022).

Masalah desain gaya kemasan dalam konteks CPS cerdas menjadi subjek proyek penelitian lainnya. Studi tersebut menyarankan sistem yang menganalisis dan mengkategorikan berbagai jenis kemasan menggunakan teknologi segmentasi semantik visual, yang memungkinkan desain dan pengoptimalan proses pengemasan otomatis. Melalui penggunaan algoritma pembelajaran mendalam, sistem tersebut mampu memahami semantik visual desain kemasan dan mengenali pola serta karakteristik penting yang meningkatkan kegunaan dan daya tarik visualnya. Desain kemasan baru yang memenuhi kebutuhan dan preferensi tertentu kemudian dapat dibuat menggunakan pengetahuan ini (Maru et al., 2022). Secara khusus, *Mobilenetv2*, yang menggabungkan teknik konvolusi dan perhatian kelompok untuk memproses fitur semantik yang kompleks secara efektif dan meningkatkan reaktivitas jaringan terhadap properti yang berharga di dalam foto kemasan, menggantikan jaringan ekstraksi fitur *DeepLabV3*. Algoritme segmentasi gambar konvensional dapat memakan waktu lama untuk menganalisis gambar, yang dapat mengakibatkan hilangnya fitur gambar yang penting dan menghasilkan hasil segmentasi yang buruk.

CPS yang ditingkatkan dengan *deep learning* merupakan salah satu teknologi Industri 4.0, tetapi penerapannya tidak tanpa kesulitan. Kebutuhan untuk menangani aspek organisasi, teknologi, dan manusia disorot dalam sebuah studi yang meneliti hambatan penerapan Industri 4.0 dalam manajemen teknik. Untuk menjamin keberhasilan adopsi teknologi baru, studi tersebut menyoroti perlunya strategi manajemen perubahan yang melibatkan semua pemangku kepentingan, termasuk manajemen, teknisi, dan karyawan. Selain itu, hal ini juga dilakukan untuk mengatasi berbagai kemungkinan masalah keamanan siber, tenaga kerja yang belum siap menghadapi transformasi, serta kurangnya standarisasi dan interoperabilitas (Maru et al., 2022). Untuk mengatasi pertentangan dan mendorong penerimaan, studi ini menyoroti pentingnya peran manajemen dalam menciptakan lingkungan yang positif, mengalokasikan sumber daya yang memadai, dan menyampaikan manfaat Industri 4.0 secara efektif.

Menggabungkan konsep desain yang berpusat pada manusia juga penting untuk menghasilkan CPS yang tidak hanya efektif tetapi juga aman, nyaman, dan mudah digunakan. Tinjauan sistematis CPS yang berpusat pada manusia di sektor industri dilakukan oleh studi lain, yang menekankan pentingnya mempertimbangkan elemen manusia seperti ergonomi, beban kognitif, dan pengalaman pengguna. Studi ini menyoroti bahwa mengutamakan elemen manusia diperlukan untuk menciptakan CPS yang tidak hanya efektif dan produktif tetapi juga meningkatkan kesejahteraan dan kepuasan kerja pekerja (Colombathanthri et al., 2025). CPS yang berpusat pada manusia dapat meningkatkan penerimaan, kepercayaan, dan kemandirian sistem secara keseluruhan dengan mengintegrasikan masukan operator dan mempertimbangkan kebutuhan serta preferensi mereka (Callari et al., 2024). Manfaat penerapan pemrosesan bahasa alami adalah dapat memberikan umpan balik yang jelas dan unik kepada sistem, yang tidak merepotkan bagi pengguna karena kurva pembelajarannya lebih sedikit saat bahasa alami digunakan (Colombathanthri et al., 2025). Mempertahankan ketertelusuran dan memaksimalkan efisiensi juga memerlukan integrasi data yang dikumpulkan oleh robot, CPS, dan sensor yang dapat dikenakan (Colombathanthri et al., 2025).

4. METODOLOGI

Penelitian yang kini tengah dipublikasikan menunjukkan perkembangan penggabungan pembelajaran mendalam ke dalam sistem siber-fisik, dimulai dengan manipulasi lengan robot yang dipandu oleh penglihatan mesin (Ghannam et al., t.t.). Strategi segmentasi yang lebih baik, metodologi

manajemen perubahan, dan pertimbangan etika semuanya berkontribusi pada evolusi sistem ini. Aspek multidisiplin dari keberhasilan pengintegrasian pembelajaran mendalam ke dalam sistem siber-fisik untuk revolusi industri disorot oleh tinjauan pustaka ini, yang menggabungkan inovasi teknologi dengan manajemen strategis dan isu etika untuk sepenuhnya memenuhi potensinya.

Metodologi tinjauan ini mencakup pencarian dan pemeriksaan metodis atas laporan industri terkait, prosiding konferensi, dan jurnal penelitian. Frasa pencarian seperti "*deep learning*," "sistem siber-fisik," "revolusi industri," "robotika," "manufaktur," dan "desain yang berpusat pada manusia" digunakan untuk mencari basis data akademis dan mesin pencari (Colombathanthri et al., 2025). Setelah identifikasi, sumber-sumber tersebut dievaluasi untuk penerapannya pada isu penelitian dan kemampuannya untuk memajukan pengetahuan tentang integrasi pembelajaran mendalam dalam CPS. Untuk menemukan tema, pola, dan kesulitan penting, data yang diperoleh dari sumber-sumber yang dipilih digabungkan dan diperiksa.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kerangka kerja CPS yang menggunakan pembelajaran mendalam untuk mengarahkan lengan robot menggunakan kartu remi sebagai sinyal visual disajikan dalam makalah pertama, "*Deep Learning Based Cyber Physical System Framework for Real-Time Industrial Operations*" (Maru et al., 2022). Kerangka kerja tersebut berupaya meningkatkan akurasi dan fleksibilitas lengan robot dalam proses industri real-time. Kerangka kerja tersebut mengambil peran pemrograman robot konvensional yang dikodekan secara keras, yang memungkinkan sistem beradaptasi dengan perubahan dalam ukuran, bentuk, dan orientasi objek. Robot dan komputer ITX kecil terhubung melalui pertukaran data *real-time*.

Seiring dengan semakin otonomnya sistem siber-fisik dan terintegrasinya berbagai aspek kehidupan manusia, pertimbangan etika menjadi sangat penting untuk dimasukkan ke dalam desain dan implementasinya (Colombathanthri et al., 2025). Untuk menjamin kesetaraan, keterbukaan, dan akuntabilitas, konsekuensi etika dari prosedur pengambilan keputusan berbasis AI di CPS harus diperiksa dengan saksama. Mencegah hasil yang diskriminatif dan memajukan keadilan sosial memerlukan penciptaan algoritma yang tidak memihak dan mengutamakan kesejahteraan manusia. Desain dan implementasi CPS dapat dipandu oleh teori etika seperti utilitarianisme, deontologi, dan etika kebajikan, yang sejalan dengan standar moral dan norma masyarakat.

Lebih jauh lagi, untuk melindungi data sensitif dan menghentikan penyalahgunaan atau akses ilegal, diperlukan langkah-langkah privasi dan keamanan data yang kuat. Untuk memastikan implikasi teknologi CPS yang lebih luas, pendidikan dan pelatihan juga penting. Mereka menekankan perspektif yang berpusat pada manusia, seperti keberlanjutan dan privasi, dalam pendidikan CPS untuk memastikan bahwa kita berakhir dengan masyarakat berbasis CPS yang berpusat pada manusia dan meningkatkan standar pengajaran, pembelajaran, dan penelitian (Colombathanthri et al., 2025). Di era transformasi digital, di mana manusia dipandang sebagai pengemudi yang sangat adaptif dalam sistem otomatis, pelibatan manusia dalam sistem siber-fisik sangatlah penting (Fantini et al., 2019). Untuk memaksimalkan efektivitas dan ketahanan sistem ini, metode ini mengakui pentingnya kecerdasan, pengalaman, dan adaptasi manusia (Colombathanthri et al., 2025). Literatur yang saat ini diterbitkan menyoroti pentingnya konsep desain yang berpusat pada manusia dalam menjamin bahwa CPS tidak hanya efektif tetapi juga aman, nyaman, dan mudah digunakan (Colombathanthri et al., 2025).

Dengan menekankan unsur manusia, CPS yang berpusat pada manusia dapat meningkatkan penerimaan, kepercayaan, dan kemanjuran sistem secara keseluruhan, yang menghasilkan pengembangan sistem yang meningkatkan kesejahteraan dan produktivitas pekerja (Berger et al., 2020). Untuk mengatasi keengganan dan mendorong penerapan, manajemen harus memainkan peran penting dalam menciptakan lingkungan yang mendukung, mengalokasikan sumber daya yang memadai, dan menyampaikan manfaat Industri 4.0 secara efektif (Hernández, 2024). Efektivitas implementasi Industri 4.0 dipengaruhi secara positif oleh strategi manajemen perubahan, yang

menyoroti peran penting yang dimainkan oleh perencanaan strategis dan kepemimpinan dalam mengelola transisi organisasi.

Lebih jauh lagi, untuk memenuhi persyaratan kerangka kerja baru ini, peningkatan fleksibilitas dalam pengembangan produk dan proses sangatlah penting (Ghannam et al., t.t.). Sebagai komponen dasar dari barang yang sukses, desain proses manufaktur industri semakin menekankan keberlanjutan dan efisiensi sumber daya (Ghannam et al., t.t.). Peningkatan kepuasan pelanggan, penurunan kegagalan produk, dan peningkatan efektivitas dapat dihasilkan dari penerapan solusi Industri 4.0 (Ghannam et al., t.t.). Dengan mendigitalkan proses produksi, meningkatkan integrasi rantai pasokan, dan memungkinkan pemantauan waktu nyata, Industri 4.0 merevolusi sektor industri dan mendorong kerja sama yang lebih besar antara produsen dan pelanggan (Ghannam et al., t.t.). Bisnis dapat menjadi lebih kompetitif, kompeten, dan efisien di pasar saat ini (Ghannam et al., t.t.).

Pengembangan sistem siber dan model bisnis yang dimungkinkan oleh transformasi digital sangat meningkatkan rantai nilai perusahaan (Egor, 2020). Membangun sistem siber-fisik yang menghubungkan dunia fisik dan siber merupakan tahap pengembangan penting dalam Industri 4.0 (Roblek et al., 2021). Dalam Industri 4.0, *Internet of Things* merupakan konsep manufaktur kontemporer yang telah merangkul perkembangan terkini, seperti infrastruktur teknologi informasi canggih untuk pengumpulan dan pertukaran data, dan memiliki dampak substansial pada kinerja sistem produksi (Sari et al., 2020). Lebih jauh, dalam konteks Industri 4.0, yang menekankan penggunaan teknologi manufaktur, digitalisasi, dan pemrosesan data untuk mengoptimalkan arus informasi, konsep manajemen dan pemeliharaan menjadi penting (Pačaiová et al., 2021). Dalam konteks manufaktur digital, isu lingkungan, teknologi, dan sosial memiliki dampak yang cukup besar terhadap adopsi Industri 4.0 (Chatterjee et al., 2021). Untuk sepenuhnya mewujudkan janji Industri 4.0 di sektor industri, studi ini menyoroti perlunya mengatasi hambatan utama dan memodifikasi strategi. Revolusi Industri Ketiga diwujudkan dalam penggabungan manufaktur digital dan fisik (Ghannam et al., t.t.).

Dengan menggabungkan sistem siber-fisik yang meningkatkan efisiensi sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan, Industri 4.0 merupakan perubahan dramatis menuju proses manufaktur berkelanjutan (Carvalho et al., 2018). Dengan menggunakan strategi ini, perusahaan dapat meningkatkan siklus hidup produk, mengurangi limbah, dan mengoptimalkan proses produksi—yang semuanya membantu menciptakan ekonomi yang lebih sirkular dan berkelanjutan (Carvalho et al., 2018). Selain mengurangi konsumsi sumber daya dan mendorong pengelolaan lingkungan, perpindahan ke kembaran digital dan pemeliharaan prediktif juga memperpanjang umur peralatan dan mengurangi waktu henti (Ghannam et al., t.t.).

Analisis *big data*, *cloud computing*, dan internet industri adalah beberapa teknologi yang memungkinkan gagasan Industri 4.0, yang menghadirkan peluang yang sebelumnya tidak pernah terdengar bagi industri manufaktur untuk meningkatkan operasi mereka (Åkerman et al., 2018; Cynthia et al., 2021). Pada dasarnya, sistem siber-fisik menggabungkan proses digital dan fisik, menciptakan konvergensi yang telah mengantarkan era baru bagi sektor manufaktur (Ghannam et al., t.t.). Sebagai komponen utama Industri 4.0, pabrik pintar menggabungkan teknologi fisik dan siber untuk meningkatkan transparansi, manajemen, dan pengendalian proses manufaktur. Hal ini memungkinkan produsen untuk memenuhi permintaan pelanggan akan siklus hidup produk yang lebih pendek dan kustomisasi (Shi et al., 2020).

6. SIMPULAN

Pertumbuhan dinamis dalam otomasi industri ditunjukkan oleh peralihan dari mengintegrasikan *deep learning* untuk kontrol lengan robot ke memprioritaskan sistem siber-fisik yang berpusat pada manusia (Colombathanthri et al., 2025). Fondasi untuk aplikasi yang lebih kompleks dibangun oleh penekanan awal pada peningkatan presisi robot menggunakan panduan visual berbasis pembelajaran mendalam (Ghannam et al., t.t.). Kendala kecepatan pemrosesan diatasi dengan

peningkatan selanjutnya dengan segmentasi semantik visual, yang menggambarkan pencarian berkelanjutan untuk efektivitas dan fleksibilitas (Arinez et al., 2020).

Kebutuhan akan manajemen perubahan juga diakui, yang menekankan betapa pentingnya mengintegrasikan teknologi dengan strategi organisasi untuk mencapai adopsi dan implementasi yang sukses. Integrasi akhir protokol keselamatan, keterlibatan manusia, dan pertimbangan etika menunjukkan strategi komprehensif untuk mengembangkan sistem industri yang canggih dan berpusat pada manusia, yang membuka pintu bagi Industri 5.0. Ghannam dkk. (tanpa tanggal), Mohapatra dkk. (2021), Jena dkk. (2019), Schuh dkk. (2014), Krupitzer dkk. (2020), dan Colombathanthri dkk. (2025).

REFERENSI

- Åkerman, M., Stahre, J., Engström, U., Angelsmark, O., McGillivray, D., Holmberg, T., Barring, M., Lundgren, C., Friis, M., & Fast-Berglund, Å. (2018). Technical Interoperability for Machine Connectivity on the Shop Floor. *Technologies*, 6(3), 57. <https://doi.org/10.3390/technologies6030057>
- Arinez, J., Chang, Q., Gao, R. X., Xu, C., & Zhang, J. (2020). Artificial Intelligence in Advanced Manufacturing: Current Status and Future Outlook. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11). <https://doi.org/10.1115/1.4047855>
- Ashibani, Y., & Mahmoud, Q. H. (2017). Cyber physical systems security: Analysis, challenges and solutions. *Computers & Security*, 68, 81. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.04.005>
- Berger, T., Sallez, Y., Dequidt, A., & Trentesaux, D. (2020). A generic architecture to design Cyber-Physical and Human Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 53(5), 344. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.111>
- Callari, T. C., Segate, R. V., Hubbard, E., Daly, A., & Lohse, N. (2024). An Ethical Framework for Human-Robot Collaboration for the Future People-Centric Manufacturing: A Collaborative Endeavour with European subject-matter experts in Ethics. *Technology in Society*, 78, 102680. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102680>
- Carvalho, N. G. P., Chaim, O. C., Cazarini, E. W., & Gerólamo, M. C. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 671. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.170>
- Chatterjee, S., Rana, N. P., Dwivedi, Y. K., & Baabdullah, A. M. (2021). Understanding AI adoption in manufacturing and production firms using an integrated TAM-TOE model. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, 120880. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120880>
- Colombathanthri, A., Jomaa, W., & Chinniah, Y. (2025). Human-centered cyber-physical systems in manufacturing industry: a systematic search and review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14959-w>
- Cynthia, M.-T., Ingrid, P.-L., & Alicia, Y.-M. (2021). Digitization trends in hospitality and tourism. *Smart Tourism*, 2(2). <https://doi.org/10.54517/st.v2i2.1709>
- Dhirani, L. L., Mukhtiar, N., Chowdhry, B. S., & Newe, T. (2023). Ethical Dilemmas and Privacy Issues in Emerging Technologies: A Review [Review of Ethical Dilemmas and Privacy Issues in Emerging Technologies: A Review]. *Sensors*, 23(3), 1151. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/s23031151>
- Dignum, V. (2018). Ethics in artificial intelligence: introduction to the special issue. *Ethics and Information Technology*, 20(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s10676-018-9450-z>
- Egor, P. (2020). Digital Transformation of Industrial Companies: What is Management 4.0? 131. <https://doi.org/10.1145/3414752.3414779>
- Fantini, P., Leitão, P., Barbosa, J., & Taisch, M. (2019). Symbiotic Integration of Human Activities in Cyber-Physical Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 52(19), 133. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.124>

- Ghannam, O., Ojiako, U., & Dweiri, F. (n.d.). Exploring Barriers to Implementing Industry 4.0 in Engineering Management: A Theoretical Investigation.
- Haque, S. A., Aziz, S. M., & Rahman, M. (2014). Review of Cyber-Physical System in Healthcare. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10(4), 217415. <https://doi.org/10.1155/2014/217415>
- Hernández, E. (2024). Towards an Ethical and Inclusive Implementation of Artificial Intelligence in Organizations: A Multidimensional Framework. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2405.01697>
- Hoffmann, M., Malakuti, S., Grüner, S., Finster, S., Gebhardt, J., Tan, R., Schindler, T., & Gamer, T. (2021). Developing Industrial CPS: A Multi-Disciplinary Challenge. *Sensors*, 21(6), 1991. <https://doi.org/10.3390/s21061991>
- Jamwal, A., Agrawal, R., Manupati, V. K., Sharma, M., Varela, L., & Machado, J. (2020). Development of cyber physical system based manufacturing system design for process optimization. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 997(1), 12048. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/997/1/012048>
- Jena, M. C., Mishra, S. K., & Moharana, H. S. (2019). Application of Industry 4.0 to enhance sustainable manufacturing. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(1). <https://doi.org/10.1002/ep.13360>
- Krupitzer, C., Müller, S., Lesch, V., Züfle, M., Edinger, J., Lemken, A., Schäfer, D., Kounev, S., & Becker, C. (2020). A Survey on Human Machine Interaction in Industry 4.0. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2002.01025>
- Lun, Y. Z., D’Innocenzo, A., Smarra, F., Malavolta, I., & Benedetto, M. D. D. (2018). State of the art of cyber-physical systems security: An automatic control perspective. *Journal of Systems and Software*, 149, 174. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.12.006>
- Maru, V., Nannapaneni, S., Krishnan, K., & Arishi, A. (2022). Deep-Learning-Based Cyber-Physical System Framework for Real-Time Industrial Operations. *Machines*, 10(11), 1001. <https://doi.org/10.3390/machines10111001>
- Mohapatra, B., Tripathy, S., Singhal, D., & Saha, R. (2021). Significance of digital technology in manufacturing sectors: Examination of key factors during Covid-19. *Research in Transportation Economics*, 93, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101134>
- Mohdhar, A., & Shaalan, K. (2021). The Future of E-Commerce Systems: 2030 and Beyond. In *Studies in systems, decision and control* (p. 311). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64987-6_18
- Pačaiová, H., Nagyová, A., Turisová, R., Híjj, J., Vilinský, T., & Firmentová, K. (2021). Principles of Management and Position of Maintenance in the I4.0 Environment. *Acta Mechanica Slovaca*, 25(1), 14. <https://doi.org/10.21496/ams.2021.012>
- Piardi, L., Leitão, P., Queiroz, J., & Pontes, J. (2024). Role of digital technologies to enhance the human integration in industrial cyber-physical systems. *Annual Reviews in Control*, 57, 100934. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2024.100934>
- Pîrvu, B.-C., Zamfirescu, C.-B., & Gorecky, D. (2015). Engineering insights from an anthropocentric cyber-physical system: A case study for an assembly station. *Mechatronics*, 34, 147. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.08.010>
- Rai, R., & Sahu, C. K. (2020). Driven by Data or Derived Through Physics? A Review of Hybrid Physics Guided Machine Learning Techniques With Cyber-Physical System (CPS) Focus [Review of Driven by Data or Derived Through Physics? A Review of Hybrid Physics Guided Machine Learning Techniques With Cyber-Physical System (CPS) Focus]. *IEEE Access*, 8, 71050. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2987324>

- Roblek, V., Meško, M., Pušavec, F., & Likar, B. (2021). The Role and Meaning of the Digital Transformation As a Disruptive Innovation on Small and Medium Manufacturing Enterprises. *Frontiers in Psychology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.592528>
- Sari, M. W., Herianto, H., Dharma, I. G. B. B., & Tontowi, A. E. (2020). Design of Product Monitoring System Using Internet of Things Technology for Smart Manufacturing. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 835(1), 12048. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/835/1/012048>
- Schuh, G., Potente, T., Varandani, R., Hausberg, C., & Fränken, B. (2014). Collaboration Moves Productivity to the Next Level. *Procedia CIRP*, 17, 3. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.037>
- Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L., & Xu, X. (2020). Smart factory in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 607. <https://doi.org/10.1002/sres.2704>
- Wan, J., Li, X., Dai, H., Kusiak, A., Martínez-García, M., & Li, D. (2020). Artificial-Intelligence-Driven Customized Manufacturing Factory: Key Technologies, Applications, and Challenges. *Proceedings of the IEEE*, 109(4), 377. <https://doi.org/10.1109/jproc.2020.3034808>
- Wang, L., Törngren, M., & Onori, M. (2015). Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 517. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008>