

Programmable Logic Controller (PLC) : Literature Review

Ricky Permadi¹, M Agung Trijayadi², Owen Mulya³, Rizky Ramadhani⁴, Akbar Maulana Yusuf⁵,
Hibarkah Kurnia⁶

^{1,2,3,4,5,6}Teknik Industri, Universitas Pelita Bangsa

E-mail: ¹emailnyaricky23@gmail.com

Abstrak

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan komponen penting dalam otomasi industri yang berperan dalam pengendalian, monitoring, dan integrasi sistem cerdas. Meskipun telah digunakan secara luas, implementasi PLC menghadapi berbagai tantangan, termasuk keterbatasan fleksibilitas pemrograman manual, hambatan interoperability dengan sistem Industry 4.0, risiko cybersecurity, serta keterbatasan pemrosesan data secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan literature review komprehensif terkait perkembangan, implementasi, dan inovasi pada PLC, dengan fokus pada integrasi teknologi cerdas seperti Large Language Models (LLMs), digital twin, predictive root cause analysis, dan IoT, serta penerapan PLC dalam pendidikan teknis. Metode penelitian menggunakan identifikasi dan seleksi literatur dari basis data Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, dan ACM Digital Library, diikuti ekstraksi data terkait permasalahan, tujuan, metode, subjek, hasil, dan simpulan masing-masing studi, kemudian dianalisis secara kualitatif untuk menilai tren, keunggulan, dan tantangan pengembangan PLC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa inovasi seperti penggunaan LLM untuk otomatisasi kode, integrasi digital twin untuk monitoring produksi, serta simulasi pembelajaran berbasis PLC mampu meningkatkan efisiensi, akurasi, keandalan, dan adaptabilitas sistem. Modul komunikasi, interface yang adaptif, dan kemampuan integrasi jaringan menjadi aspek penting dalam mendukung otomasi industri modern. Studi ini memberikan pemahaman menyeluruh mengenai evolusi, potensi, dan batasan PLC dalam mendukung otomasi yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Digital Twin, Industry 4.0, Large Language Models, PLC, Otomasi Industri

Abstract

Programmable Logic Controllers (PLCs) are essential components in industrial automation, serving as the backbone for controlling, monitoring, and integrating intelligent systems. Despite their widespread adoption, PLC implementation faces several challenges, including limited flexibility in manual programming, interoperability barriers with Industry 4.0 systems, cybersecurity risks, and constraints in real-time data processing. This study aims to conduct a comprehensive literature review on the development, implementation, and innovation of PLCs, focusing on the integration of intelligent technologies such as Large Language Models (LLMs), digital twins, predictive root cause analysis, and IoT, as well as PLC applications in technical education. The research method involved identification and

selection of relevant literature from Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, and ACM Digital Library, followed by data extraction on issues, objectives, methods, subjects, findings, and conclusions of each study, and qualitative analysis to identify trends, advantages, and challenges in PLC development. The results indicate that innovations such as LLM-based code automation, digital twin integration for production monitoring, and PLC-based learning simulators can significantly improve efficiency, accuracy, reliability, and system adaptability. Additionally, communication modules, adaptive interfaces, and network integration capabilities are critical for supporting modern industrial automation. This study provides a comprehensive understanding of the evolution, potential, and limitations of PLCs in enabling secure, efficient, and sustainable automation.

Keywords: Digital Twin, Industry 4.0, Large Language Models, PLC, Industrial Automation

Pendahuluan

Dalam era industrialisasi dan kemajuan teknologi yang pesat, *otomasi* telah menjadi faktor penting dalam meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan keandalan di berbagai industri manufaktur maupun jasa (Ramirez et al., 2022). Permintaan yang semakin tinggi terhadap proses produksi yang berkualitas, efisien, dan tepat waktu mendorong industri untuk mengadopsi sistem kontrol canggih yang mampu mengelola operasi kompleks dengan intervensi manusia yang minimal. *Programmable Logic Controller (PLC)* muncul sebagai teknologi utama, memungkinkan pemantauan dan pengendalian otomatis pada mesin, proses, dan sistem industri dengan tingkat presisi dan adaptabilitas yang tinggi (Zubair et al., 2022).

PLC dikenal luas karena ketangguhan, modularitas, dan kemampuannya bekerja dalam lingkungan industri yang keras. Berbeda dengan perangkat kontrol konvensional, PLC menawarkan fleksibilitas dalam pemrograman, pemantauan proses secara *real-time*, serta integrasi yang mudah dengan sistem otomasi lainnya. Kesenyaannya membuat PLC cocok untuk berbagai aplikasi, mulai dari lini produksi, manajemen energi, hingga sistem transportasi. Seiring waktu, PLC telah berkembang dari perangkat sederhana pengganti *relay* menjadi platform canggih yang mendukung kerangka otomasi modern (Ali & Kamal, 2025).

Perkembangan pesat Industry 4.0 dan manufaktur cerdas semakin menekankan pentingnya PLC dalam menciptakan sistem industri yang saling terhubung dan berbasis data. Lingkungan industri modern menuntut sistem kontrol yang tidak hanya efisien, tetapi juga adaptif terhadap kondisi dinamis, mampu menangani volume data *real-time* yang besar, dan kompatibel dengan perangkat *Internet of Things (IoT)* serta teknologi cerdas lainnya. Perubahan ini menyoroti potensi sekaligus tantangan dalam meningkatkan kemampuan PLC agar sesuai dengan kebutuhan industri yang terus berkembang (Lashin & Malibari, 2022).

Teknologi ini masih menghadapi tantangan, termasuk optimalisasi efisiensi pemrograman, peningkatan keandalan sistem, dan integrasi dengan teknologi digital modern. Kebutuhan akan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi, komunikasi sistem yang lebih baik, dan keamanan yang lebih terjamin menjadi semakin penting. Oleh karena itu, pemahaman terhadap prinsip dasar, fungsi, dan tren pengembangan PLC menjadi sangat penting untuk mendukung otomasi industri yang efisien, cerdas, dan berkelanjutan di era modern (Katulić et al., 2023).

Penelitian (Sharma et al., 2022) dalam *Designing and implementing a smart transplanting framework using programmable logic controller and photoelectric sensor* memanfaatkan PLC untuk mengelola sistem deteksi elektrik pada benih tanaman, sehingga meningkatkan akurasi dan efisiensi penanaman secara otomatis melalui *automatic quality control* dan *assurance system* dalam kerangka *smart transplanting*. Penelitian (Liu et al., 2026) melalui *Agents4PLC: Automating closed-loop PLC code generation and verification in industrial control systems using LLM-based agents* menekankan penggunaan *Large Language Models (LLMs)* untuk otomatisasi pembuatan dan verifikasi kode PLC, memungkinkan kontrol sistem industri yang lebih cepat dan akurat dalam tahap-tahap yang sebelumnya memerlukan banyak tenaga manual. Penelitian (Fakih et al., 2024) dalam *LLM4PLC: Harnessing large language models for verifiable programming of PLCs in industrial control systems* menyoroti pentingnya PLC dalam otomasi industri dan bagaimana integrasi LLM dapat mengurangi beban tinggi dalam pemrograman PLC, sehingga mendukung keandalan sistem industri berskala besar. Penelitian (Chen et al., 2023) mengkaji bagaimana PLC dapat digunakan dalam pendidikan teknis untuk membangun kemampuan *computational thinking* siswa dengan bantuan *cognitive* dan *metacognitive prompts*, sedangkan (Chukwunweike et al., 2024) menekankan integrasi *deep learning*, MATLAB, dan CAD canggih untuk *predictive root cause analysis*, yang secara signifikan meningkatkan kemampuan sistem PLC dalam mengontrol proses industri.

Meskipun PLC telah menjadi tulang punggung otomasi industri, sejumlah permasalahan masih menghambat implementasi optimal. Banyak sistem PLC masih mengandalkan pemrograman manual yang kompleks dan memakan waktu, sehingga memunculkan risiko kesalahan manusia dan keterbatasan fleksibilitas dalam menyesuaikan proses baru. Integrasi PLC dengan sistem modern berbasis *Industry 4.0*, *IoT*, dan *digital twin* sering menemui hambatan terkait interoperabilitas, keamanan (*cybersecurity*), serta keterbatasan kapasitas pemrosesan data secara *real-time*. Tantangan lain adalah kebutuhan akan pengembangan sistem yang dapat memverifikasi kode secara otomatis, seperti yang dibahas dalam penelitian LLM4PLC dan Agents4PLC, untuk menjamin keandalan dan konsistensi kontrol industri. Permasalahan ini menjadi semakin penting karena industri modern menuntut efisiensi tinggi, akurasi, dan kemampuan adaptasi yang cepat terhadap perubahan proses produksi.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan *literature review* menyeluruh terkait penerapan dan pengembangan PLC dalam otomasi industri dan pendidikan, dengan fokus pada inovasi teknologi seperti LLM, *digital twin*, dan sistem *predictive analysis*. Secara khusus, penelitian ini ingin mengidentifikasi tren terbaru dalam pengembangan PLC, metode pengendalian otomatis yang efisien, integrasi dengan sistem cerdas, serta tantangan yang dihadapi. Tujuan lainnya adalah membandingkan berbagai pendekatan yang digunakan dalam penelitian terdahulu untuk menilai efektivitas dan kelebihan masing-masing metode, serta menyusun kerangka konseptual yang dapat menjadi acuan bagi pengembangan PLC di masa depan. Dengan demikian, penelitian ini memberikan pemahaman mendalam mengenai evolusi, potensi, dan batasan teknologi PLC.

Urgensi penelitian ini muncul dari kebutuhan industri modern untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan keandalan sistem otomasi yang berbasis PLC. Dengan meningkatnya tuntutan *Industry 4.0*, perusahaan harus mampu mengimplementasikan PLC yang tidak hanya mampu mengendalikan proses secara otomatis, tetapi juga beradaptasi dengan sistem cerdas berbasis *IoT*, *digital twin*, dan integrasi *cloud computing*. Keterbatasan metode pemrograman tradisional dan risiko *cybersecurity* menuntut penelitian yang menyatukan pendekatan inovatif, termasuk pemanfaatan LLM dan

predictive analytics. Penelitian ini penting untuk memberikan panduan bagi pengembangan PLC yang lebih adaptif, aman, dan efisien dalam menghadapi kompleksitas proses industri modern.

Novelty dari penelitian ini terletak pada pendekatan komprehensif dalam menggabungkan studi literatur terkait PLC dengan integrasi teknologi cerdas dan metodologi modern seperti LLM, *digital twin*, dan *predictive root cause analysis*. Tidak hanya meninjau penerapan PLC dalam otomasi industri, penelitian ini juga mengeksplorasi pemanfaatan PLC dalam pendidikan teknis untuk membangun *computational thinking*, serta bagaimana sistem verifikasi kode otomatis dapat meningkatkan keandalan kontrol industri. Dengan menggabungkan temuan dari berbagai penelitian terbaru, kajian ini menawarkan perspektif baru yang menghubungkan pengembangan teknologi, implementasi praktis, dan potensi inovasi dalam PLC, sehingga memberikan kontribusi orisinal bagi penelitian dan praktik otomasi industri.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan *literature review* sebagai metode utama untuk menganalisis perkembangan, implementasi, dan inovasi pada *Programmable Logic Controller (PLC)* dalam otomasi industri dan pendidikan teknis. Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi artikel ilmiah yang relevan melalui basis data *Scopus*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, dan *ACM Digital Library*, dengan fokus pada publikasi antara tahun 2022 hingga 2026. Selanjutnya, dilakukan seleksi literatur berdasarkan relevansi topik, kontribusi penelitian, dan metodologi yang digunakan, termasuk studi eksperimen, prototyping, dan pengembangan sistem berbasis *LLM*, *digital twin*, dan *IoT*. Setelah itu, dilakukan ekstraksi data yang mencakup permasalahan, tujuan, metode, subjek, hasil, dan simpulan dari setiap artikel. Data yang terkumpul kemudian dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi tren, tantangan, dan peluang pengembangan PLC, sekaligus membandingkan berbagai pendekatan penelitian sebelumnya untuk menilai keunggulan dan keterbatasannya. Dengan pendekatan ini, penelitian mampu menyajikan pemahaman komprehensif mengenai evolusi, aplikasi, dan inovasi terkini pada teknologi PLC dalam mendukung otomasi industri modern.

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan analisis *literature review* terhadap sepuluh artikel terkini, penelitian ini berhasil mengidentifikasi permasalahan utama, tujuan penelitian, metode yang digunakan, subjek yang dikaji, hasil eksperimen atau temuan, serta simpulan dari masing-masing studi terkait *Programmable Logic Controller (PLC)* dalam otomasi industri dan pendidikan teknis. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian menekankan kebutuhan peningkatan fleksibilitas pemrograman, integrasi dengan sistem *Industry 4.0* seperti *IoT* dan *digital twin*, optimasi kinerja hardware dan software, serta peningkatan keamanan (*cybersecurity*) dan verifikasi kode PLC. Inovasi seperti penggunaan *Large Language Models (LLMs)*, *fog computing*, dan *predictive root cause analysis* juga menjadi fokus dalam beberapa studi untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan adaptabilitas sistem PLC. Tabel 1 menyajikan ringkasan komprehensif dari setiap artikel yang dianalisis, mencakup permasalahan yang diangkat, tujuan penelitian, metode yang digunakan, subjek, hasil, dan simpulan yang diperoleh, sehingga memberikan gambaran menyeluruh tentang tren, tantangan, dan inovasi terkini dalam pengembangan PLC.

Tabel 1. Hasil *Literature Review*

No	Penulis	Permasalahan	Tujuan	Metode	Subjek	Hasil	Simpulan
1	(Yao et al., 2024)	Perkembangan teknologi <i>Programmable Logic Controller (PLC)</i> belum sepenuhnya memenuhi kebutuhan industri berkelanjutan, terutama dalam aspek <i>hardware, software,</i> dan integrasi sistem	Mengidentifikasi tren pengembangan <i>PLC</i> serta memberikan rekomendasi untuk mendukung <i>sustainable industrial development</i>	<i>Fuzzy Delphi Method</i> dan <i>Fuzzy Hierarchical Analysis (AHP)</i> berbasis wawancara ahli	Komponen <i>PLC</i> (CPU, <i>memory unit, communication module, syntax,</i> dan <i>interface</i>)	<i>Communication module</i> menjadi komponen paling penting, diikuti CPU dan pengembangan sintaks; diperlukan peningkatan kapasitas program dan konektivitas jaringan	Pengembangan <i>PLC</i> harus difokuskan pada peningkatan komunikasi, fleksibilitas pemrograman, dan integrasi jaringan untuk meningkatkan daya saing dan keberlanjutan industri
2	(Mellado & Núñez, 2022)	<i>PLC</i> konvensional belum mampu memenuhi tuntutan <i>Industry 4.0</i> yang membutuhkan sistem <i>hyper-connected</i> dan fleksibel	Merancang <i>IoT-PLC</i> berbasis <i>containerized architecture</i> untuk mendukung sistem otomasi modern	<i>Experimental design</i> dan <i>prototyping</i> dengan pendekatan <i>containerization</i>	Sistem <i>IoT-PLC</i> dengan <i>fog computing, virtual device,</i> dan <i>wireless interface</i>	Sistem mampu melakukan <i>live migration,</i> pemrosesan data lokal, serta integrasi dengan <i>cloud system</i>	<i>IoT-PLC</i> memberikan fleksibilitas tinggi dan kompatibilitas dengan arsitektur <i>Industry 4.0</i>
3	(Vadi et al., 2022)	Sistem kontrol motor induksi masih	Mengembangkan sistem kontrol dan monitoring	<i>Experimental setup</i> menggunakan <i>TIA Portal,</i>	Motor induksi dengan <i>frequency converter</i>	Sistem mampu mengukur penggunaan	Penggunaan <i>PLC</i> dengan <i>fieldbus communication</i>

		kompleks, tidak efisien, dan memerlukan banyak perangkat tambahan	motor induksi berbasis PLC dengan Profibus communication	SCADA, dan OPC Server	dan sistem komunikasi industri	n kabel dan perangkat tambahan, meningkatkan efisiensi, keamanan, dan kecepatan respon	meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem kontrol industri
4	(Rachana, 2025)	Tantangan dalam implementasi PLC meliputi keamanan (cybersecurity), integrasi sistem lama, dan keterbatasan fleksibilitas	Menganalisis pengembangan dan implementasi PLC dalam real-time industrial automation	Systematic literature review, analisis kualitatif dan kuantitatif, serta case study	Sistem PLC berbasis standar IEC 61131-3 dan integrasi OPC UA	PLC memiliki keunggulan pada real-time response, modularitas, dan skalabilitas, namun memiliki kelemahan pada biaya dan keamanan	PLC tetap menjadi komponen utama otomasi, tetapi perlu peningkatan pada aspek keamanan, interoperabilitas, dan standar terbuka
5	(Lv, 2025)	Sistem kontrol otomatis tradisional memiliki keterlambatan respon, rendahnya efisiensi data, dan keterbatasan deteksi kesalahan	Merancang perangkat lunak kontrol berbasis PLC untuk sistem otomasi listrik cerdas	System design menggunakan finite state machine (FSM), signal processing, dan eksperimen	Sistem otomasi listrik dengan modul I/O, HMI, dan communication (Modbus, PROFINET)	Akurasi sensor sangat tinggi (error < 1.30%), sistem lebih stabil, responsif, dan mampu melakukan fault diagnosis	Implementasi PLC meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kemampuan adaptif sistem otomasi

6	(Shaheed & Selman, 2023)	Mesin industri lama masih dioperasikan secara manual sehingga produktivitas rendah dan berisiko tinggi	Mendesain sistem kontrol otomatis berbasis PLC untuk pemotong plat baja	<i>Design and implement ation</i> serta uji coba lapangan	Mesin pemotong plat baja dengan <i>encoder</i> dan <i>HMI</i>	Produktivitas meningkat lebih dari 30%, biaya produksi menurun drastis, dan keselamatan meningkat	Modernisasi sistem menggunakan <i>PLC</i> sangat efektif dalam meningkatkan efisiensi dan keselamatan kerja
7	(Kholikhmatov et al., 2023)	Metode pembelajaran <i>PLC</i> kurang interaktif dan berisiko jika dilakukan langsung pada sistem nyata	Mengembangkan <i>training simulator</i> berbasis <i>PLC</i> untuk pembelajaran	Pengembangan sistem dan evaluasi pembelajaran	Simulator pembelajaran <i>power supply</i> berbasis <i>PLC</i>	Simulator memberikan lingkungan belajar yang aman, fleksibel, dan meningkatkan pemahaman mahasiswa	<i>PLC-based simulator</i> efektif untuk meningkatkan kualitas pembelajaran teknik
8	(Cheong et al., 2023)	<i>PLC</i> memiliki keterbatasan dalam <i>real-time monitoring</i> jika tidak dikombinasikan dengan sistem tambahan	Mengembangkan sistem <i>digital twin</i> berbasis <i>PLC</i> untuk monitoring dan kontrol produksi	<i>Prototype development</i> menggunakan <i>GUI</i> dan integrasi <i>cyber-physical system</i>	Sistem manufaktur berbasis <i>PLC</i> dan <i>CX-Programmer</i>	Sistem memungking dan kontrol <i>real-time</i> melalui <i>GUI</i>	Integrasi <i>PLC</i> dengan konsep <i>digital twin</i> meningkatkan efisiensi dan visibilitas sistem produksi
9	(Wang et al., 2023)	Sistem berbasis <i>PLC</i> rentan terhadap serangan siber akibat	Mengkaji kerentanan, serangan, dan metode deteksi keamanan	<i>Survey dan literature review</i>	Sistem kontrol industri (<i>Industrial Control System/ICS</i>)	Ditemukan berbagai jenis serangan terhadap aspek <i>confidentia</i>	Keamanan <i>PLC</i> harus menjadi prioritas utama dalam pengembangan

		integrasi dengan jaringan eksternal	pada sistem PLC		S) berbasis PLC	lity, integrity, dan availability	gan sistem industri modern
10	(Bilancia et al., 2023)	Sistem kontrol dan pemrograman robot industri masih kurang fleksibel dan kompleks	Mengkaji berbagai pendekatan kontrol dan pemrograman robot industri	Literature review komprehensif	Robot industri (Industrial Robots/IRs) dan sistem kontrolnya	Ditemukan berbagai metode seperti trajectory streaming dan instruction streaming dengan kelebihan dan keterbatasan masing-masing	Diperlukan inovasi dalam metode kontrol untuk meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi sistem robotik industri

Pengembangan dan implementasi Programmable Logic Controller (PLC) berdasarkan literature review terhadap sepuluh penelitian terkini menunjukkan bahwa PLC tetap menjadi komponen inti dalam otomasi industri yang berperan penting dalam pengendalian proses, monitoring sistem, serta integrasi dengan teknologi cerdas modern. Analisis terhadap penelitian Yao, Lin, dan Pan (2024) menekankan bahwa meskipun teknologi PLC telah berkembang, komponen-komponen utama seperti CPU, memory unit, communication module, syntax, dan interface masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk mendukung industri berkelanjutan. Communication module menjadi fokus utama karena perannya yang penting dalam memastikan konektivitas jaringan dan fleksibilitas komunikasi antar sistem, diikuti oleh peningkatan kapasitas program dan adaptasi sintaks, sehingga pengembangan PLC harus menekankan integrasi jaringan yang efisien serta fleksibilitas pemrograman untuk meningkatkan daya saing industri.

Penelitian Mellado dan Núñez (2022) menunjukkan bahwa PLC konvensional memiliki keterbatasan dalam memenuhi tuntutan Industry 4.0, yang menekankan sistem yang *hyper-connected* dan adaptif. Implementasi IoT-PLC berbasis containerized architecture terbukti mampu menyediakan fleksibilitas tinggi, mempermudah integrasi dengan sistem cloud, serta memungkinkan pemrosesan data lokal melalui *fog computing*. Hal ini menunjukkan bahwa arsitektur baru PLC harus menggabungkan kemampuan komunikasi canggih, mobilitas perangkat virtual, dan integrasi nirkabel agar sesuai dengan tren otomasi modern. Penelitian Vadi et al. (2022) pada sistem kontrol motor induksi mengungkapkan bahwa penggunaan fieldbus communication berbasis PLC dapat meningkatkan efisiensi, keamanan, dan kecepatan respon sistem secara signifikan, mengurangi kebutuhan perangkat tambahan, serta meminimalkan kompleksitas instalasi, yang menunjukkan bahwa inovasi pada protokol komunikasi PLC merupakan kunci dalam pengembangan sistem industri yang lebih responsif.

Keamanan sistem juga menjadi fokus utama dalam literatur yang dianalisis. Penelitian Wang et al. (2023) mengidentifikasi berbagai serangan terhadap sistem berbasis PLC yang menargetkan aspek *confidentiality, integrity, dan availability* dalam jaringan industri. Hal ini menegaskan perlunya peningkatan keamanan siber (*cybersecurity*) sebagai prioritas utama, termasuk penggunaan metode verifikasi kode otomatis, enkripsi data, dan monitoring real-time untuk memitigasi risiko yang timbul dari integrasi jaringan eksternal. Rachana (2025) menambahkan bahwa implementasi standar terbuka seperti IEC 61131-3 dan integrasi OPC UA dapat mendukung modularitas, skalabilitas, dan interoperabilitas PLC, meskipun tantangan terkait biaya dan kompleksitas keamanan masih harus diatasi. Penekanan pada keamanan dan interoperabilitas ini menjadi sangat relevan dalam industri modern yang menuntut fleksibilitas tinggi dan proses produksi yang aman dan andal.

Penelitian Lv (2025) dan Shaheed & Selman (2023) menyoroti peningkatan kinerja operasional melalui perangkat lunak kontrol berbasis PLC. Sistem otomasi listrik cerdas yang mengintegrasikan modul I/O, HMI, dan protokol komunikasi seperti Modbus dan PROFINET terbukti mampu meningkatkan akurasi sensor, stabilitas sistem, serta kemampuan diagnosa kesalahan (*fault diagnosis*). Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan perangkat lunak PLC yang mendukung *finite state machine* dan pemrosesan sinyal cerdas dapat memberikan respons sistem yang lebih cepat, efisien, dan adaptif terhadap perubahan kondisi industri. Implementasi pada mesin pemotong plat baja menunjukkan peningkatan produktivitas hingga lebih dari 30%, pengurangan biaya produksi, dan peningkatan keselamatan kerja, sehingga modernisasi sistem dengan PLC tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga keselamatan dan keandalan operasional.

Dari perspektif pendidikan dan pengembangan sumber daya manusia, penelitian Kholikhmatov et al. (2023) dan Chen et al. (2023) menegaskan manfaat PLC dalam pembelajaran teknis. Simulator berbasis PLC menyediakan lingkungan aman dan fleksibel untuk praktik pembelajaran, memungkinkan mahasiswa memahami prinsip dasar dan operasional sistem otomatis tanpa risiko kerusakan pada perangkat nyata. Pendekatan ini juga meningkatkan kemampuan *computational thinking* melalui *cognitive* dan *metacognitive prompts*, sehingga menghasilkan tenaga kerja yang lebih siap menghadapi tuntutan otomasi industri modern. Integrasi PLC dalam kurikulum pendidikan teknik menunjukkan bahwa teknologi ini bukan hanya alat kontrol industri, tetapi juga platform penting untuk membangun kompetensi teknis generasi mendatang.

Penelitian Cheong et al. (2023) dan Bilancia et al. (2023) menunjukkan bahwa integrasi konsep digital twin dan inovasi pada sistem kontrol robot industri meningkatkan visibilitas dan fleksibilitas sistem secara signifikan. Digital twin berbasis PLC memungkinkan monitoring real-time melalui antarmuka GUI yang intuitif, sedangkan metode seperti trajectory streaming dan instruction streaming pada robot industri memperluas kemampuan sistem untuk menyesuaikan diri dengan proses dinamis. Integrasi ini mendukung pemeliharaan prediktif, pengambilan keputusan berbasis data, dan peningkatan efisiensi operasional, menunjukkan bahwa PLC masa depan harus dirancang agar kompatibel dengan teknologi *cyber-physical system*, sistem IoT, dan strategi manufaktur cerdas untuk meningkatkan keandalan dan produktivitas.

Inovasi teknologi cerdas seperti pemanfaatan Large Language Models (LLMs) juga menjadi tren penting. Penelitian Liu et al. (2026) dan Fakih et al. (2024) menekankan bahwa LLM dapat digunakan untuk otomatisasi pembuatan dan verifikasi kode PLC, mengurangi beban pemrograman manual, meminimalkan risiko kesalahan manusia, dan meningkatkan kecepatan serta akurasi implementasi sistem. Pendekatan ini memberikan keuntungan signifikan pada pengembangan PLC skala besar dan sistem industri yang kompleks, karena kode yang dihasilkan dapat diverifikasi secara otomatis dan

diintegrasikan dengan prosedur kontrol industri yang sudah ada. Hal ini menunjukkan arah masa depan PLC yang semakin adaptif, terverifikasi, dan efisien dalam mendukung otomasi modern.

Pengembangan PLC harus menekankan fleksibilitas pemrograman, kemampuan komunikasi dan integrasi jaringan, keamanan siber, modularitas perangkat keras, serta inovasi pada perangkat lunak kontrol. Inovasi seperti integrasi LLM, digital twin, dan predictive root cause analysis terbukti meningkatkan efisiensi, akurasi, keandalan, dan adaptabilitas sistem industri. Penerapan PLC dalam pendidikan teknis juga memiliki dampak signifikan terhadap kesiapan sumber daya manusia di bidang otomasi. Dengan menggabungkan temuan dari berbagai penelitian, jelas bahwa PLC masa depan akan menjadi fondasi strategis otomasi industri yang lebih aman, cerdas, adaptif, dan berkelanjutan, mendukung implementasi Industry 4.0 dan memberikan kerangka kerja inovatif yang relevan untuk industri modern dan pendidikan teknik.

Kesimpulan

Berdasarkan *literature review* terhadap sepuluh penelitian terbaru terkait *Programmable Logic Controller (PLC)*, dapat disimpulkan bahwa PLC tetap menjadi tulang punggung otomasi industri dan memiliki peran sentral dalam pengendalian proses, monitoring sistem, serta integrasi dengan teknologi cerdas modern. Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun PLC telah banyak digunakan, berbagai tantangan masih ada, seperti keterbatasan fleksibilitas pemrograman manual, hambatan *interoperability* dengan sistem *Industry 4.0*, risiko *cybersecurity*, serta keterbatasan dalam pemrosesan data secara *real-time*. Inovasi seperti pemanfaatan *Large Language Models (LLMs)* untuk otomatisasi pembuatan dan verifikasi kode, implementasi *digital twin* untuk monitoring produksi, serta penggunaan *predictive root cause analysis* terbukti mampu meningkatkan efisiensi, akurasi, dan keandalan sistem industri. Penerapan PLC dalam pendidikan teknis juga menunjukkan manfaat signifikan dalam membangun kemampuan *computational thinking* siswa melalui simulator interaktif, sehingga mendukung kesiapan tenaga kerja di bidang otomasi. Dari perspektif implementasi, penelitian menekankan pentingnya modul komunikasi (*communication module*), kemampuan integrasi jaringan, modularitas perangkat keras, serta *interface* yang adaptif untuk memenuhi tuntutan otomasi modern. Pengembangan PLC masa depan perlu mengedepankan pendekatan yang lebih fleksibel, aman, dan terverifikasi, menggabungkan teknologi cerdas, integrasi *IoT*, *cloud computing* dan standar terbuka, sehingga tidak hanya meningkatkan efisiensi dan daya saing industri, tetapi juga memberikan kerangka kerja adaptif yang mendukung keberlanjutan dan inovasi berkelanjutan di era *Industry 4.0* dan seterusnya. Kesimpulan ini menegaskan bahwa PLC bukan sekadar perangkat kontrol industri, melainkan fondasi strategis yang terus berkembang melalui integrasi teknologi modern, inovasi metodologis, dan penerapan cerdas dalam berbagai industri dan pendidikan.

Daftar Pustaka

- [1] Ali, A. R., & Kamal, H. (2025). Real-time digital twin-driven optimization of industrial machinery. *2025 15th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG)*, 1–6.
- [2] Bilancia, P., Schmidt, J., Raffaeli, R., Peruzzini, M., & Pellicciari, M. (2023). An overview of industrial robots control and programming approaches. *Applied Sciences*, *13*(4), 2582.
- [3] Chen, C.-H., Liu, T.-K., & Huang, K. (2023). Scaffolding vocational high school students' computational thinking with cognitive and metacognitive prompts in learning about programmable logic controllers. *Journal of Research on Technology in Education*, *55*(3), 527–544.
- [4] Cheong, A. C. H., Jie, K. F., Xian, J. I. Y. Y., Ibrahim, Z., & Ramesh, S. (2023). Digital twin in manufacturing by using programmable logic controller (PLC). *AIP Conference Proceedings*, *2643*(1), 50021.

- [5] Chukwunweike, J. N., Chikwado, C. E., Ibrahim, A., & Adewale, A. A. (2024). Integrating deep learning, MATLAB, and advanced CAD for predictive root cause analysis in PLC systems: A multi-tool approach to enhancing industrial automation and reliability. *World Journal of Advance Research and Review GSC Online Press*, 1778–1790.
- [6] Fakhri, M., Dharmaji, R., Moghaddas, Y., Quiros, G., Ogundare, O., & Al Faruque, M. A. (2024). Llm4plc: Harnessing large language models for verifiable programming of plcs in industrial control systems. *Proceedings of the 46th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice*, 192–203.
- [7] Katulić, F., Sumina, D., Groš, S., & Erceg, I. (2023). Protecting modbus/TCP-based industrial automation and control systems using message authentication codes. *IEEE Access*, 11, 47007–47023.
- [8] Kholikhmatov, B. B., Samiev, S. S., Erejepov, M. T., & Nematov, L. A. (2023). Modelling of laboratory work in the science “Fundamentals of power supply” using an educational simulator based on a programmed logic controller. *E3S Web of Conferences*, 384, 1032.
- [9] Lashin, M. M. A., & Malibari, A. A. (2022). Using fuzzy logic control system as an artificial intelligence tool to design soap bubbles robot as a type of interactive games. *Inf. Sci. Lett*, 11(1), 15–19.
- [10] Liu, Z., Zeng, R., Wang, D., Peng, G., Liu, X., Liu, Q., Liu, P., Wang, W., & Wang, J. (2026). Agents4plc: Automating closed-loop plc code generation and verification in industrial control systems using llm-based agents. *IEEE Transactions on Software Engineering*.
- [11] Lv, G. (2025). Design and Implementation of Programmable Controller Control Software for Intelligent Electrical Automation Systems. *2025 3rd International Conference on Data Science and Information System (ICDSIS)*, 1–6.
- [12] Mellado, J., & Núñez, F. (2022). Design of an IoT-PLC: A containerized programmable logical controller for the industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 25, 100250.
- [13] Rachana, C. (2025). Development and Implementation of Programmable Logic Controller (PLC) Systems for Real-Time Industrial Automation. *International Journal of Multidisciplinary Research in Science, Engineering, Technology & Management*, 1(01), 7–9.
- [14] Ramirez, R., Chang, C.-K., & Liang, S.-H. (2022). PLC cyber-security challenges in industrial networks. *2022 18th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, 1–6.
- [15] Shaheed, B. N., & Selman, N. H. (2023). Design and implementation of a control system for a steel plate cutting production line using programmable logic controller. *International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708)*, 13(4).
- [16] Sharma, B. B., Raffik, R., Chaturvedi, A., Geeitha, S., Akram, P. S., Mohanavel, V., Sudhakar, M., & Sathyamurthy, R. (2022). Designing and implementing a smart transplanting framework using programmable logic controller and photoelectric sensor. *Energy Reports*, 8, 430–444.
- [17] Vadi, S., Bayindir, R., Toplar, Y., & Colak, I. (2022). Induction motor control system with a Programmable Logic Controller (PLC) and Profibus communication for industrial plants—An experimental setup. *ISA Transactions*, 122, 459–471.
- [18] Wang, Z., Zhang, Y., Chen, Y., Liu, H., Wang, B., & Wang, C. (2023). A survey on programmable logic controller vulnerabilities, attacks, detections, and forensics. *Processes*, 11(3), 918.
- [19] Yao, K.-C., Lin, C.-L., & Pan, C.-H. (2024). Industrial sustainable development: The development trend of programmable logic controller technology. *Sustainability*, 16(14), 6230.
- [20] Zubair, N., Ayub, A., Yoo, H., & Ahmed, I. (2022). PEM: Remote forensic acquisition of PLC memory in industrial control systems. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 40, 301336.