

Tinjauan Komprehensif Evolusi, Aplikasi, dan Tren Masa Depan Programmable Logic Controllers

A Comprehensive Review of the Evolution, Applications, and Future Trends of Programmable Logic Controllers

Budi Herdiana^{*1}, Eko Budi Setiawan², Usman Sartoyo³

¹Teknik Elektro, Universitas Komputer Indonesia, Jalan Dipatiukur 112-116 Bandung

²Teknik Informatika, Universitas Komputer Indonesia, Jalan Dipatiukur 112-116 Bandung

³Teknik Elektro, Universitas Kebangsaan Republik Indonesia, Jalan Terusan Haimun 37 Bandung

Email* : budi.herdiana@email.unikom.ac.id

Abstrak - *Programmable Logic Controller (PLC)* telah menjadi komponen vital dalam otomatisasi industri dan sistem kontrol sejak kemunculannya. Perkembangan pesat PLC memicu perlunya tinjauan komprehensif terkait aplikasinya di berbagai industri. Artikel ini menyajikan tinjauan menyeluruh tentang PLC, mulai aplikasinya yang beragam, evolusi perkembangan PLC, serta tren masa depan dari PLC. Kajian literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis informasi dari berbagai sumber terpercaya, termasuk jurnal ilmiah, buku teks, dan laporan industri. Temuan menunjukkan bahwa PLC telah diterapkan secara luas di berbagai industri, termasuk manufaktur, energi, pengolahan air, transportasi, otomatisasi bangunan, dan pertanian. Integrasi teknologi seperti *Internet of Things (IoT)*, kecerdasan artificial atau *Artificial Intelligence (AI)*, dan langkah-langkah keamanan siber telah meningkatkan fungsionalitas dan keamanan sistem PLC. Studi kasus yang disajikan menunjukkan implementasi praktis dan manfaat PLC dalam berbagai skenario dunia nyata. PLC terbukti memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi operasional, keandalan, dan produktivitas di berbagai sektor. Tantangan dan tren masa depan yang dibahas dalam artikel ini termasuk integrasi PLC dalam Industri 4.0 dan otomatisasi cerdas. Kesimpulan dari kajian ini adalah PLC merupakan teknologi otomatisasi yang esensial dengan aplikasi luas di berbagai industri. Upaya penelitian dan pengembangan berkelanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan teknologi PLC dan aplikasinya di masa depan.

Kata kunci : *Programmable Logic Controller (PLC)*, aplikasi industri, teknologi PLC, tren masa depan.

Abstract - *Programmable Logic Controllers (PLCs)* have become indispensable components in industrial automation and control systems since their inception. The rapid advancement of PLCs has necessitated a comprehensive review of their applications across diverse industries. This article presents a holistic overview of PLCs, encompassing their varied applications, evolutionary development, and future trends. A comprehensive literature review was conducted, gathering and analyzing information from credible sources, including scientific journals, textbooks, and industry reports. The findings reveal that PLCs have been extensively implemented across a wide spectrum of industries, including manufacturing, energy, water treatment, transportation, building automation, and agriculture. The integration of technologies such as the *Internet of Things (IoT)*, artificial intelligence (AI), and cybersecurity measures has enhanced the functionality and security of PLC systems. Case studies presented in this article demonstrate the practical implementation and benefits of PLCs in various real-world scenarios. PLCs have been proven to play a pivotal role in improving operational efficiency, reliability, and productivity across diverse sectors. Challenges and future trends discussed in this article include PLC integration in Industry 4.0 and intelligent automation. The conclusion of this review is that PLCs are an essential automation technology with wide-ranging applications across industries. Continuous research and development efforts are crucial to optimize PLC technology and its applications in the future.

Keywords : *Programmable Logic Controller (PLC)*, industrial applications, PLC technology, future trends

I. PENDAHULUAN

Programmable Logic Controllers (PLC) adalah perangkat komputasi khusus yang digunakan untuk mengontrol dan mengotomatisasi proses industri [1-4]. Diperkenalkan pada akhir tahun 1960-an, PLC dirancang untuk menggantikan sistem kontrol berbasis relay tradisional, menawarkan solusi yang lebih fleksibel, andal, dan efisien untuk otomatisasi industri [5]. Fungsi utama PLC adalah memonitor masukan dari berbagai sensor, memproses data sesuai dengan logika yang telah diprogram sebelumnya, dan mengontrol keluaran ke aktuator atau perangkat lainnya [6]. Kemampuan ini memungkinkan PLC untuk mengelola tugas-tugas otomatisasi yang kompleks dengan presisi dan adaptabilitas [7].

Adopsi PLC telah merevolusi operasi industri, memberikan banyak keuntungan dibandingkan dengan sistem kontrol tradisional. Keuntungan-keuntungan tersebut meliputi fleksibilitas, keandalan, skalabilitas, dan integrasi [8]. PLC dapat dengan mudah diprogram ulang untuk menyesuaikan perubahan dalam proses produksi atau persyaratan sistem, mengurangi waktu henti dan meningkatkan responsivitas. Dirancang untuk beroperasi di lingkungan industri yang keras, PLC menawarkan tingkat keandalan dan ketahanan yang tinggi, memastikan operasi yang berkelanjutan dan meminimalkan kebutuhan perawatan. Sistem PLC dapat diskalakan untuk mengelola proses dengan berbagai tingkat kompleksitas, dari tugas kontrol sederhana hingga sistem otomatisasi canggih yang melibatkan ratusan masukan dan keluaran. PLC modern mendukung integrasi dengan sistem digital lainnya, termasuk sistem pengawasan dan akuisisi data (*Supervisory Control and Data Acquisition* atau SCADA) [9], sistem perencanaan sumber daya perusahaan atau *Enterprise Resource Planning* (ERP) [10], dan *Internet of Things* (IoT) [11], meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan.

PLC memainkan peran penting di berbagai industri, termasuk manufaktur, energi, pengolahan air, transportasi, otomatisasi bangunan, dan pertanian [12]. Mengingat peran kritis PLC dalam operasi industri modern, studi dan pemahaman tentang aplikasi PLC sangat penting bagi insinyur, teknisi, dan profesional industri. Tinjauan ini bertujuan untuk memberikan eksplorasi mendalam tentang berbagai aplikasi PLC, meneliti dampaknya pada berbagai sektor, kemajuan

teknologi, dan tren masa depan.

Dalam berbagai literatur, memang sudah terdapat beberapa penelitian yang membahas mengenai tinjauan aplikasi PLC. Pada artikel yang ditulis oleh Alphonsus dan Abdullah [13], dilakukan kajian mengenai aplikasi PLC di pasar saat ini dengan fokus pada penelitian energi, studi teknik, aplikasi kontrol industri, dan pemantauan tanaman. Artikel ini menyimpulkan bahwa PLC memiliki lebih banyak keuntungan dibandingkan keterbatasannya dan dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, baik untuk sistem kontrol sederhana maupun rumit. Namun, penelitian ini kurang mendalam dalam membahas integrasi teknologi terbaru seperti IoT dan kecerdasan artificial atau *Artificial Intelligence* (AI) serta kurang mengeksplorasi aspek keamanan siber dari sistem PLC. Artikel ini bertujuan untuk mengatasi kekurangan tersebut dengan menyertakan analisis tentang integrasi teknologi modern dan langkah-langkah keamanan yang relevan.

Dalam penelitian oleh Hudedmani dkk. [14], dibahas peran sentral PLC dalam sistem otomasi industri dengan menyoroti perbandingan antara sistem otomasi saat ini dan teknologi masa lalu seperti logika relay dan kontaktor. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan PLC bersama dengan sistem SCADA dan *Distributed Control System* (DCS) telah meningkatkan produktivitas, akurasi, dan efisiensi dengan mengurangi intervensi manusia. Namun, penelitian ini tidak cukup membahas tantangan yang muncul dari integrasi teknologi modern dan dampak dari serangan siber. Artikel ini akan memperluas cakupan dengan meneliti lebih dalam tentang tantangan keamanan dan integrasi teknologi mutakhir seperti IoT dan AI.

Penelitian oleh Namekar dan Yadav [15] juga mengkaji aplikasi PLC di pasar saat ini dengan fokus pada manfaatnya dalam sistem kontrol industri tradisional yang cenderung memiliki banyak koneksi kabel yang menyebabkan masalah mekanis dan kesulitan dalam pemecahan masalah. Studi ini menyoroti bahwa sistem berbasis PLC mengatasi masalah tersebut dengan bantuan perangkat keras dan perangkat lunak. Namun, penelitian ini tidak menyertakan analisis rinci tentang kasus penggunaan di berbagai industri dan bagaimana PLC beradaptasi dengan tren Industri 4.0. Artikel ini akan menyempurnakan kajian tersebut dengan menyediakan studi kasus praktis dan menyoroti peran PLC dalam konteks Industri

4.0 dan otomatisasi cerdas.

Wang dkk. [16] mengkaji kerentanan, serangan, dan skema deteksi keamanan dalam sistem kontrol berbasis PLC, terutama terkait dengan integrasi perangkat keras dan perangkat lunak komersial serta jaringan eksternal seperti Internet. Meskipun artikel ini sangat mendalam dalam analisis keamanan, kurang fokus pada aplikasi praktis PLC di berbagai industri dan teknologi terbaru yang digunakan untuk meningkatkan fungsionalitas sistem. Artikel ini bertujuan untuk melengkapi kajian tersebut dengan menyajikan aplikasi praktis dan manfaat integrasi teknologi seperti IoT dan AI dalam meningkatkan efisiensi dan keamanan sistem PLC.

Chen dkk. [10] menyoroti aplikasi PLC untuk membangun platform industri cerdas yang sesuai dengan standar Industri 4.0. Penelitian ini menunjukkan bagaimana integrasi total dengan sistem fisik siber dan penggunaan data besar dapat meningkatkan produktivitas dan kualitas produksi. Namun, penelitian ini lebih terfokus pada implementasi di lingkungan pabrik digital dan kurang membahas aplikasi di sektor lain seperti energi, pengolahan air, dan transportasi. Artikel ini akan mengatasi kekurangan tersebut dengan memberikan tinjauan yang lebih luas tentang aplikasi PLC di berbagai sektor industri.

Penelitian oleh Serhane dkk. [17] mengkaji kerentanan dan ancaman pada sistem berbasis PLC, terutama dalam konteks perangkat lapangan dan jaringan industri lokal. Meskipun penelitian ini menawarkan wawasan berharga tentang isu-isu keamanan, kurang mendalam dalam membahas solusi praktis dan aplikasi PLC di berbagai industri. Artikel ini akan melengkapi kajian tersebut dengan menyoroti penerapan praktis PLC dan langkah-langkah keamanan yang dapat diambil untuk mengatasi kerentanan yang ada.

Dengan meninjau berbagai literatur [10, 13-17], artikel ini berupaya untuk menyempurnakan dan melengkapi penelitian sebelumnya dengan menyoroti aplikasi praktis PLC di berbagai industri. Selain itu, artikel ini juga mengkaji integrasi teknologi terbaru serta memberikan solusi untuk tantangan keamanan yang dihadapi oleh sistem PLC.

Tujuan utama artikel ini adalah untuk memberikan tinjauan komprehensif tentang aplikasi PLC di berbagai industri. Mengingat PLC adalah komponen fundamental dalam otomatisasi industri, memahami aplikasi yang beragam dan

kemajuan teknologi yang mendorong evolusi PLC sangat penting bagi para profesional di bidang ini. Tinjauan ini bertujuan untuk mencapai beberapa tujuan spesifik. Pertama, artikel ini akan menyelidiki berbagai aplikasi PLC di berbagai industri, termasuk manufaktur, energi, pengolahan air, transportasi, otomatisasi bangunan, dan pertanian. Setiap sektor akan diuraikan peran dan kontribusi PLC di dalamnya. Kedua, artikel ini akan membahas kemajuan teknologi terbaru dalam PLC, termasuk integrasi IoT, AI, dan langkah-langkah keamanan siber yang ditingkatkan. Ini akan menunjukkan bagaimana inovasi-inovasi tersebut meningkatkan kemampuan dan keamanan sistem PLC. Ketiga, artikel ini akan menyajikan studi kasus yang menunjukkan implementasi sukses PLC di berbagai industri. Studi kasus ini akan memberikan wawasan praktis tentang manfaat dan tantangan yang terkait dengan penerapan solusi otomatisasi berbasis PLC. Keempat, artikel ini akan mengidentifikasi dan menganalisis tantangan saat ini dalam aplikasi dan pengembangan PLC. Selain itu, bagian ini akan mengeksplorasi tren dan perkembangan masa depan dalam teknologi PLC, termasuk peran PLC dalam Industri 4.0 dan otomatisasi cerdas. Terakhir, artikel ini akan menawarkan rekomendasi untuk penelitian dan pengembangan masa depan di bidang PLC, dengan tujuan mengoptimalkan aplikasi PLC dan mengatasi tantangan yang ada. Ini akan memberikan perspektif ke depan tentang potensi PLC untuk mendorong inovasi dan efisiensi industri lebih lanjut.

Struktur keseluruhan artikel diatur sebagai berikut. Bab Pendahuluan memberikan informasi latar belakang tentang PLC dan pentingnya dalam otomatisasi industri, menguraikan tujuan artikel serta mendefinisikan cakupan tinjauan dan menyajikan struktur keseluruhan artikel. Bab Metodologi menjelaskan pendekatan penelitian yang digunakan, yaitu tinjauan literatur sistematis dan komprehensif, serta menguraikan proses pengumpulan, analisis, dan validasi data, serta batasan penelitian. Selanjutnya, bab Aplikasi di Berbagai Industri menyelidiki berbagai aplikasi PLC di berbagai industri, termasuk manufaktur, energi, pengolahan air, transportasi, otomatisasi bangunan, dan pertanian, serta menyediakan contoh-contoh rinci tentang bagaimana PLC digunakan di setiap industri dan dampaknya terhadap efisiensi operasional dan produktivitas.

Bab Perkembangan Teknologi dalam PLC mengkaji kemajuan teknologi terbaru dalam PLC, seperti integrasi IoT, AI, dan langkah-langkah keamanan siber yang ditingkatkan, serta membahas implikasi dari kemajuan tersebut terhadap fungsionalitas dan keamanan sistem PLC. Bab Studi Kasus menyajikan studi kasus di dunia nyata yang menunjukkan implementasi sukses PLC di berbagai industri, menganalisis manfaat, tantangan, dan hasil dari implementasi tersebut. Bab Tantangan dan Tren Masa Depan mengidentifikasi dan menganalisis tantangan saat ini dalam aplikasi dan pengembangan PLC, serta mengeksplorasi tren masa depan dan potensi perkembangan teknologi PLC, termasuk peran PLC dalam Industri 4.0 dan otomatisasi cerdas. Terakhir, bab Kesimpulan merangkum temuan dan wawasan utama dari tinjauan ini, menawarkan rekomendasi untuk penelitian dan pengembangan di masa depan untuk mengoptimalkan aplikasi PLC dan mengatasi tantangan yang ada.

II. METODOLOGI

A. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur yang sistematis [18-20] dan komprehensif untuk mengkaji aplikasi PLC di berbagai industri. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pengumpulan dan analisis informasi relevan dari berbagai sumber terpercaya, seperti jurnal ilmiah, buku teks, laporan industri, dan situs web resmi organisasi terkait.

B. Pengumpulan Data

Data dalam penelitian ini dikumpulkan melalui beberapa tahap. Pertama, identifikasi kata kunci dilakukan untuk menemukan istilah yang relevan dengan topik penelitian, seperti "PLC", "aplikasi PLC", "industri", "manufaktur", "energi", "pengolahan air", "transportasi", "otomatisasi bangunan", "pertanian", "Industri 4.0", dan "otomatisasi cerdas". Kata kunci ini digunakan untuk mencari sumber informasi yang relevan dari berbagai database akademik, termasuk Google Scholar, ScienceDirect, IEEE Xplore, dan JSTOR. Sumber yang dipilih harus memenuhi kriteria: dipublikasikan dalam jurnal ilmiah atau publikasi bereputasi lainnya, ditulis oleh peneliti atau pakar di bidang terkait, menyajikan informasi yang akurat dan terpercaya, dan relevan dengan topik penelitian serta tujuan kajian. Sumber yang ditemukan kemudian dievaluasi berdasarkan relevansi, kualitas, dan kredibilitasnya, dengan

sumber yang tidak memenuhi kriteria dikeluarkan dari analisis. Data dari sumber-sumber terpilih dikumpulkan dengan membaca dan mencatat informasi relevan, seperti temuan penelitian, kesimpulan, dan contoh aplikasi PLC di berbagai industri.

C. Analisis Data

Data yang dikumpulkan dianalisis menggunakan metode analisis tematik. Langkah-langkah dalam metode ini meliputi membaca dan memahami data secara menyeluruh untuk mengidentifikasi tema-tema utama dan subtema yang muncul. Tema-tema dan subtema ini kemudian diberi kode untuk memudahkan pengorganisasian dan analisis. Data dianalisis berdasarkan tema-tema dan subtema yang telah diidentifikasi, dengan tujuan mengidentifikasi pola, tren, dan temuan kunci terkait aplikasi PLC di berbagai industri. Temuan analisis diinterpretasikan untuk memberikan makna dan pemahaman yang lebih mendalam tentang topik penelitian.

D. Validasi Data

Untuk memastikan validitas data, beberapa langkah dilakukan. Pertama, triangulasi sumber dilakukan dengan membandingkan data dari berbagai sumber untuk memastikan konsistensi dan keakuratan informasi [18]. Data juga dianalisis dan diinterpretasikan oleh pakar di bidang terkait untuk mendapatkan masukan dan validasi. Selain itu, data dan analisis diperiksa ulang secara cermat untuk memastikan tidak ada kesalahan atau kekeliruan. Melalui validasi data tersebut, juga ditemukan bahwa referensi-referensi utama dalam kajian PLC [5, 14, 16], yaitu referensi yang banyak tersitasi, telah terkumpulkan melalui metode ini.

E. Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa batasan. Pertama, penelitian hanya berfokus pada aplikasi PLC di industri-industri yang umum dibahas dalam literatur, sehingga industri lain yang mungkin menggunakan PLC mungkin tidak tercakup. Kedua, penelitian hanya menggunakan sumber-sumber yang tersedia secara publik, sehingga informasi yang tidak dipublikasikan mungkin tidak tercakup. Selain itu, analisis data bersifat subjektif dan dapat dipengaruhi oleh interpretasi peneliti. Meskipun terdapat batasan-batasan ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang komprehensif dan akurat tentang aplikasi PLC di berbagai industri. Temuan penelitian ini dapat bermanfaat bagi para peneliti, praktisi industri, dan

pemangku kepentingan lainnya yang tertarik dengan teknologi PLC dan potensinya untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan kualitas di berbagai sektor.

III. Aplikasi PLC di Berbagai Industri

A. Manufaktur: Otomatisasi Lini Produksi, Kontrol Mesin, dan Pemantauan Proses Otomatisasi Lini Produksi.

Industri manufaktur merupakan salah satu sektor utama yang secara luas memanfaatkan PLC untuk otomatisasi, kontrol proses, dan pemantauan. PLC digunakan secara luas untuk mengotomatisasi lini produksi di fasilitas manufaktur berbagai industri, termasuk otomotif, elektronik, makanan dan minuman, serta farmasi. PLC mengontrol dan mengoordinasikan operasi mesin dan peralatan yang terlibat dalam proses produksi [21, 22], seperti konveyor, robot, stasiun perakitan, dan mesin pengemasan. Dengan memprogram PLC untuk melaksanakan rangkaian operasi yang telah ditentukan sebelumnya, produsen dapat mencapai produksi berkecepatan tinggi, sinkronisasi peralatan yang presisi, dan integrasi mulus antar tahap proses.

Kontrol Mesin

PLC juga digunakan untuk kontrol mesin pada peralatan manufaktur seperti mesin *Computer Numerical Control* (CNC), mesin injeksi molding, dan mesin milling CNC [23, 24]. PLC berinteraksi dengan sensor, aktuator, dan perangkat umpan balik untuk memantau dan mengatur parameter mesin seperti kecepatan, posisi, suhu, dan tekanan. Dengan menerapkan algoritma kontrol yang diprogram ke dalam PLC, produsen dapat mencapai kontrol yang presisi atas pergerakan mesin, mengoptimalkan parameter proses, dan mempertahankan kualitas produk yang konsisten.

Proses Pemantauan

PLC memainkan peran penting dalam pemantauan [25, 26] dan kontrol proses di pabrik manufaktur, di mana PLC mengumpulkan data dari sensor dan perangkat instrumen untuk memantau variabel proses seperti suhu, tekanan, laju aliran, dan level. PLC menganalisis data yang dikumpulkan secara *real-time*, mendeteksi penyimpangan dari nilai setpoint, dan memulai tindakan korektif untuk mempertahankan stabilitas proses dan kualitas produk. PLC juga memberikan tampilan grafis dan alarm kepada operator untuk

memvisualisasikan kondisi proses dan merespons situasi abnormal dengan cepat.

Manfaat Otomatisasi PLC dalam Manufaktur

Manfaat otomatisasi PLC dalam manufaktur meliputi peningkatan produktivitas [22, 27], di mana otomatisasi PLC merampingkan proses produksi, mengurangi waktu siklus, dan meminimalkan waktu henti, sehingga menghasilkan produktivitas dan throughput yang lebih tinggi. Selain itu, kualitas yang lebih baik dapat dicapai karena PLC memastikan konsistensi dan repetabilitas dalam operasi manufaktur, menghasilkan kualitas produk yang lebih tinggi dan mengurangi cacat. Fleksibilitas dan skalabilitas juga menjadi keunggulan, karena sistem otomatisasi berbasis PLC dapat dengan mudah diprogram ulang dan dikonfigurasi ulang untuk mengakomodasi perubahan dalam kebutuhan produksi dan meningkatkan atau mengurangi skala sesuai kebutuhan. Keamanan yang ditingkatkan juga menjadi manfaat penting, karena PLC mengimplementasikan fitur keselamatan seperti penghentian darurat, interlock, dan diagnosis kesalahan untuk melindungi personel dan peralatan dari kecelakaan dan bahaya. Terakhir, penghematan biaya dapat dicapai dengan otomatisasi PLC yang mengurangi biaya tenaga kerja, limbah material, dan konsumsi energi, menghasilkan penghematan biaya keseluruhan bagi produsen.

B. Energi: Manajemen Jaringan Listrik, Kontrol Turbin, dan Sistem Energi Terbarukan

Pada sektor energi, PLC memainkan peran penting dalam mengelola jaringan listrik, mengontrol turbin, dan mengintegrasikan sistem energi terbarukan ke dalam jaringan.

Manajemen Jaringan Listrik

PLC adalah komponen penting dari sistem SCADA yang digunakan untuk memantau dan mengontrol jaringan listrik [28, 29]. Sistem SCADA mengintegrasikan PLC, sensor, dan jaringan komunikasi untuk mengumpulkan data *real-time* dari gardu induk, saluran transmisi, dan jaringan distribusi. PLC menganalisis data dan mengeksekusi perintah kontrol untuk mengatur tingkat tegangan, menyesuaikan aliran daya, dan mengelola operasi jaringan dengan efisien.

Kontrol Turbin

PLC banyak digunakan untuk mengontrol turbin di pembangkit listrik [30, 31], termasuk turbin uap, turbin gas, dan turbin hidroelektrik. Sistem kontrol berbasis PLC mengatur operasi turbin, mengelola urutan startup dan shutdown, serta mengoptimalkan parameter kinerja seperti kecepatan, beban, dan efisiensi. PLC berinteraksi dengan sensor, aktuator, dan katup kontrol untuk memantau kondisi turbin, menyesuaikan parameter operasi, dan memastikan operasi peralatan turbin yang aman dan efisien.

Sistem Energi Terbarukan

PLC memainkan peran penting dalam mengintegrasikan sistem energi terbarukan [32, 33], seperti panel surya fotovoltaik (PV), turbin angin, dan sistem penyimpanan baterai, ke dalam jaringan listrik. Sistem kontrol berbasis PLC mengelola pembangkitan, konversi, dan penyimpanan energi terbarukan, mengoptimalkan output daya, dan memastikan integrasi yang mulus dengan sumber daya konvensional dan infrastruktur jaringan.

Manfaat Otomasi PLC di Sektor Energi

Manfaat otomasi PLC di sektor energi mencakup peningkatan keandalan jaringan melalui pemantauan kondisi jaringan, pengoptimalan aliran daya, dan respons terhadap kejadian jaringan secara *real-time* [6, 34]. Selain itu, PLC mengoptimalkan operasi turbin dan sistem energi terbarukan, memaksimalkan output energi, dan meminimalkan kerugian, yang menghasilkan efisiensi energi yang lebih baik. PLC juga memfasilitasi integrasi sumber energi terbarukan ke dalam jaringan, memungkinkan transisi ke campuran energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Keamanan jaringan juga ditingkatkan dengan sistem SCADA berbasis PLC yang menerapkan langkah-langkah keamanan siber, memantau anomali, dan mengimplementasikan protokol respons cepat untuk mengurangi ancaman potensial. Selain itu, otomasi PLC mengurangi biaya operasional, biaya pemeliharaan, dan downtime, yang menghasilkan penghematan biaya bagi utilitas energi dan konsumen.

C. Pengolahan Air Minum dan Air Limbah: Otomatisasi Pengolahan Air Minum dan Pengolahan Air Limbah

Pada fasilitas pengolahan air minum dan air limbah, PLC memainkan peran penting dalam

mengotomatisasi proses, memantau kualitas air, dan mengoptimalkan operasi pengolahan.

Otomatisasi Pengolahan Air Minum

PLC banyak digunakan di instalasi pengolahan air minum [35-38] untuk mengotomatisasi berbagai proses yang terlibat dalam pengolahan air mentah dan menghasilkan air layak minum. Sistem kontrol berbasis PLC memantau parameter kualitas air, mengatur dosis bahan kimia, mengontrol proses filtrasi dan desinfeksi, serta mengelola operasi pompa, katup, dan peralatan lainnya.

Otomatisasi Pengolahan Air Limbah

PLC sangat penting bagi instalasi pengolahan air limbah, di mana PLC mengotomatisasi pengolahan limbah domestik dan industri untuk menghilangkan kontaminan dan polutan sebelum dibuang ke lingkungan [39, 40]. Sistem kontrol berbasis PLC mengelola berbagai proses pengolahan, termasuk tahap pengolahan primer, sekunder, dan tersier, serta penanganan dan pembuangan lumpur.

Manfaat Otomatisasi PLC dalam Pengolahan Air Minum dan Air Limbah

Manfaat otomasi PLC dalam pengolahan air minum dan air limbah mencakup peningkatan efisiensi pengolahan [36], di mana sistem kontrol berbasis PLC mengoptimalkan proses pengolahan, mengurangi penggunaan bahan kimia, konsumsi energi, dan waktu pengolahan, serta memaksimalkan efisiensi penghilangan polutan. Selain itu, PLC meningkatkan kualitas air dengan memantau parameter kualitas air secara *real-time* dan menyesuaikan parameter pengolahan untuk memastikan produksi air minum yang bersih dan aman serta penghilangan kontaminan yang efektif dari air limbah. Otomatisasi PLC juga mengurangi biaya operasional dengan mengurangi biaya tenaga kerja, biaya pemeliharaan, dan downtime yang terkait dengan operasi dan pemantauan proses pengolahan secara manual, menghasilkan penghematan biaya keseluruhan bagi utilitas air dan pemerintah daerah. Selain itu, sistem kontrol berbasis PLC membantu fasilitas pengolahan air minum dan air limbah memenuhi persyaratan regulasi untuk kualitas air, batas pembuangan efluen, dan perlindungan lingkungan, memastikan kepatuhan terhadap peraturan lokal, negara bagian, dan federal. Otomatisasi PLC juga meminimalkan dampak lingkungan dari operasi pengolahan air minum dan air limbah dengan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya, mengurangi

penggunaan bahan kimia, dan meminimalkan produksi limbah dan produk sampingan.

D. Transportasi: Sistem Kontrol Sinyal Kereta Api, Manajemen Lalu Lintas, dan Sistem Navigasi

Pada sektor transportasi, PLC memainkan peran penting dalam mengelola sistem kontrol sinyal kereta api, manajemen lalu lintas, dan sistem navigasi, meningkatkan keselamatan, keandalan, dan efisiensi dalam jaringan transportasi.

Sistem Kontrol Sinyal Kereta Api

PLC merupakan komponen integral dalam sistem kontrol sinyal kereta api [41-44], di mana PLC mengotomatisasi operasi perangkat sinyal seperti lampu, lonceng, dan gerbang untuk memastikan pergerakan kereta yang aman di sepanjang rel. Sistem kontrol berbasis PLC memantau okupansi rel, mengontrol sinyal di sisi rel, dan mengaktifkan perangkat peringatan di perlintasan sebidang untuk mencegah tabrakan dan kecelakaan.

Manajemen Lalu Lintas

PLC memainkan peran penting dalam sistem manajemen lalu lintas [41, 45-47], di mana PLC mengotomatisasi kontrol sinyal lalu lintas, tanda pesan variabel, dan sistem pengumpulan tol elektronik untuk mengoptimalkan arus lalu lintas dan meningkatkan keselamatan jalan. Sistem kontrol berbasis PLC memantau kondisi lalu lintas, menyesuaikan waktu sinyal, dan menerapkan strategi kontrol lalu lintas adaptif untuk mengurangi kemacetan dan meminimalkan waktu perjalanan bagi pengendara.

Sistem Navigasi

PLC digunakan dalam sistem navigasi untuk kendaraan dan kapal [48, 49] di mana PLC mengotomatisasi perencanaan rute, panduan, dan fungsi penentuan posisi untuk membantu pengemudi dan navigator mencapai tujuan PLC dengan aman dan efisien. Sistem navigasi berbasis PLC mengintegrasikan *Global Positioning System* (GPS), *Geographic Information System* (GIS), dan sensor navigasi inersial untuk menyediakan informasi dan panduan navigasi *real-time* kepada pengguna.

Manfaat Otomatisasi PLC dalam Transportasi

Manfaat otomatisasi PLC dalam sektor transportasi mencakup peningkatan keselamatan, di mana sistem kontrol berbasis PLC meningkatkan keselamatan dalam jaringan

transportasi dengan menyediakan fungsi sinyal, interlocking, dan manajemen lalu lintas yang andal, mengurangi risiko kecelakaan dan tabrakan. Efisiensi yang lebih baik juga dicapai dengan otomatisasi PLC yang mengoptimalkan arus lalu lintas, mengurangi kemacetan, dan meminimalkan waktu perjalanan bagi pengendara, meningkatkan efisiensi transportasi dan mobilitas secara keseluruhan. Dampak lingkungan yang berkurang juga menjadi salah satu manfaat, di mana sistem navigasi berbasis PLC mengoptimalkan perencanaan rute dan pengaturan kendaraan, mengurangi konsumsi bahan bakar, emisi, dan polusi lingkungan yang terkait dengan perjalanan kendaraan. Pengalaman pengguna yang ditingkatkan juga tercapai dengan sistem navigasi berbasis PLC yang menyediakan pengguna dengan bantuan navigasi yang akurat dan andal, meningkatkan keselamatan, kenyamanan, dan kenyamanan pengemudi di jalan dan perairan. Selain itu, penghematan biaya juga didapatkan dengan otomatisasi PLC yang mengurangi biaya operasional, biaya pemeliharaan, dan downtime yang terkait dengan operasi manual dan pemantauan sistem transportasi, menghasilkan penghematan biaya keseluruhan bagi agen transportasi dan pengguna.

E. Bangunan dan Infrastruktur: Sistem Kontrol Bangunan Cerdas dan Infrastruktur Perkotaan

Pada sektor konstruksi dan infrastruktur sangat diuntungkan dari teknologi otomatisasi canggih PLC memainkan peran penting dalam mengawasi fungsi bangunan cerdas dan memastikan pengelolaan infrastruktur perkotaan yang efisien. Bagian ini mengeksplorasi aplikasi PLC di sektor bangunan dan infrastruktur, dengan fokus pada sistem kontrol bangunan cerdas dan manajemen infrastruktur perkotaan.

Sistem Kontrol Bangunan Cerdas

PLC sangat penting dalam penerapan sistem kontrol bangunan cerdas [50, 51] yang bertujuan meningkatkan kenyamanan penghuni, efisiensi energi, dan efisiensi operasional di bangunan komersial dan residensial. Sistem kontrol berbasis PLC mengintegrasikan perangkat otomatisasi bangunan seperti sensor, aktuator, dan sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) untuk memantau dan mengatur lingkungan bangunan, pencahayaan, keamanan, dan penggunaan energi.

Manajemen Infrastruktur Perkotaan

PLC memainkan peran penting dalam mengelola infrastruktur perkotaan [52, 53], termasuk jaringan transportasi, utilitas, dan layanan publik, untuk memastikan operasi dan pemeliharaan lingkungan perkotaan yang efisien. Sistem kontrol berbasis PLC memantau dan mengontrol berbagai komponen infrastruktur seperti sinyal lalu lintas, lampu jalan, sistem distribusi air, dan fasilitas pengelolaan limbah untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya, meningkatkan pelayanan, dan meningkatkan kelayakan hidup perkotaan.

Manfaat Otomatisasi PLC dalam Bangunan dan Infrastruktur

Manfaat otomatisasi PLC dalam sektor bangunan dan infrastruktur mencakup peningkatan efisiensi operasional, di mana sistem kontrol berbasis PLC mengoptimalkan operasi bangunan dan infrastruktur, mengurangi konsumsi energi, meningkatkan pemanfaatan sumber daya, dan meminimalkan kebutuhan perawatan. Kenyamanan penghuni juga ditingkatkan dengan otomatisasi PLC yang meningkatkan kenyamanan dan produktivitas penghuni dengan mempertahankan lingkungan dalam ruangan, tingkat pencahayaan, dan kondisi keamanan yang optimal di bangunan komersial dan residensial. Selain itu, penghematan biaya dicapai dengan otomatisasi berbasis PLC yang mengurangi biaya operasional, biaya energi, dan biaya perawatan yang terkait dengan manajemen bangunan dan infrastruktur, menghasilkan penghematan biaya keseluruhan bagi pemilik properti dan pemerintah kota. Keberlanjutan lingkungan juga dipromosikan dengan otomatisasi PLC yang mengoptimalkan penggunaan energi, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan meminimalkan generasi limbah di sistem bangunan dan infrastruktur perkotaan. Terakhir, ketahanan perkotaan ditingkatkan dengan sistem kontrol berbasis PLC yang meningkatkan keandalan, responsivitas, dan adaptabilitas sistem infrastruktur terhadap kondisi lingkungan yang berubah, bencana alam, dan pertumbuhan populasi.

F. Pertanian: Otomatisasi Irigasi dan Manajemen Pertanian Presisi

Pada sektor pertanian, PLC memainkan peran penting dalam mengotomatisasi sistem irigasi dan menerapkan praktik pertanian presisi, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan air, produktivitas tanaman, dan pengelolaan sumber daya. Bagian ini mengeksplorasi aplikasi PLC di

sektor pertanian, dengan fokus pada otomatisasi irigasi dan manajemen pertanian presisi.

Otomatisasi Irigasi

PLC adalah komponen penting dari sistem irigasi modern [54, 55], di mana PLC mengotomatisasi kontrol pengiriman air ke tanaman berdasarkan faktor-faktor seperti tingkat kelembaban tanah, kondisi cuaca, dan kebutuhan air tanaman. Sistem kontrol irigasi berbasis PLC mengintegrasikan sensor, aktuator, dan jaringan komunikasi untuk memantau tingkat kelembaban tanah, menghitung jadwal irigasi, dan mengontrol operasi pompa, katup, dan sprinkler.

Manajemen Pertanian Presisi

PLC memainkan peran penting dalam manajemen pertanian presisi [56, 57], yang melibatkan penggunaan teknologi untuk memantau, menganalisis, dan mengoptimalkan praktik pertanian untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan. Sistem pertanian presisi berbasis PLC mengintegrasikan data dari berbagai sumber, seperti sensor tanah, penerima GPS, drone, dan citra satelit, untuk memungkinkan petani membuat keputusan yang didasarkan pada data mengenai manajemen tanaman, pemupukan, pengendalian hama, dan panen.

Manfaat Otomatisasi PLC dalam Pertanian

Manfaat otomatisasi PLC dalam sektor pertanian mencakup konservasi air [58], di mana sistem otomatisasi irigasi berbasis PLC mengoptimalkan penggunaan air dengan memberikan jumlah air yang tepat kepada tanaman berdasarkan tingkat kelembaban tanah dan kondisi cuaca, mengurangi pemborosan air dan melestarikan sumber daya air. Peningkatan hasil panen dicapai melalui sistem pertanian presisi berbasis PLC yang meningkatkan produktivitas tanaman dengan mengoptimalkan praktik penanaman, pemupukan, dan pengendalian hama berdasarkan data dan analitik *real-time*, menghasilkan hasil dan kualitas yang lebih tinggi. Efisiensi sumber daya juga ditingkatkan dengan otomatisasi PLC yang meningkatkan efisiensi sumber daya dalam pertanian dengan meminimalkan penggunaan input seperti air, pupuk, dan pestisida, serta memaksimalkan pemanfaatan lahan, tenaga kerja, dan mesin. Keberlanjutan lingkungan dipromosikan melalui praktik pertanian presisi berbasis PLC yang mengurangi limpasan bahan kimia, erosi tanah, dan emisi gas rumah kaca yang terkait dengan metode pertanian konvensional. Terakhir, kelayakan

ekonomi ditingkatkan dengan otomatisasi PLC yang meningkatkan kelayakan ekonomi pertanian dengan mengurangi biaya produksi, meningkatkan hasil dan kualitas tanaman, serta meningkatkan profitabilitas dan daya saing peternakan di pasar.

IV. Perkembangan Teknologi pada PLC

A. Integrasi IoT dan Peran PLC dalam IoT

IoT telah muncul sebagai paradigma teknologi yang transformatif, memungkinkan konektivitas dan interoperabilitas perangkat fisik, sensor, dan sistem melalui internet. PLC memainkan peran penting dalam integrasi teknologi IoT dengan sistem otomatisasi dan kontrol industri, memfasilitasi akuisisi data secara *real-time*, analisis, dan pengambilan keputusan dalam berbagai aplikasi. Bagian ini mengeksplorasi konvergensi teknologi IoT dan PLC serta peran PLC dalam memungkinkan otomatisasi dan kecerdasan yang didorong oleh IoT.

Ikhtisar Integrasi IoT dengan PLC

Integrasi IoT dengan PLC melibatkan penerapan sensor, aktuator, dan modul komunikasi di lingkungan industri untuk mengumpulkan dan mengirimkan data ke PLC untuk diproses dan dikontrol. PLC berfungsi sebagai penghubung antara dunia fisik dan dunia digital, berinteraksi dengan perangkat IoT dan platform berbasis cloud untuk memungkinkan pemantauan jarak jauh, pemeliharaan prediktif, dan kontrol adaptif dalam proses industri [59, 60].

Komponen Utama Sistem PLC yang Didukung IoT

Sistem PLC yang didukung IoT terdiri dari beberapa komponen utama, termasuk sensor dan aktuator, antarmuka komunikasi, perangkat komputasi tepi, dan platform cloud. Sensor IoT menangkap data *real-time* tentang variabel fisik seperti suhu, tekanan, laju aliran, dan getaran, sementara aktuator memungkinkan PLC mengontrol proses industri dan peralatan berdasarkan input sensor. PLC dilengkapi dengan antarmuka komunikasi, seperti Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, dan konektivitas seluler, untuk bertukar data dengan perangkat IoT, perangkat komputasi tepi, dan platform cloud. Perangkat komputasi tepi, seperti gateway dan server tepi, memproses data yang dikumpulkan dari sensor IoT sebelum mengirimkannya ke PLC, mengurangi latensi dan kebutuhan bandwidth untuk kontrol dan analitik *real-time*. Platform IoT berbasis cloud menyediakan alat penyimpanan, analitik, dan

visualisasi untuk memproses dan menafsirkan data yang dikumpulkan dari PLC dan perangkat IoT, memungkinkan pemantauan, analisis, dan manajemen aset dan proses industri dari jarak jauh [61, 62].

Aplikasi Sistem PLC yang Didukung IoT

Sistem PLC yang didukung IoT menemukan aplikasi di berbagai industri dan domain, termasuk pemeliharaan prediktif, pemantauan dan kontrol jarak jauh, manajemen energi, optimasi rantai pasok, dan jaminan kualitas. Sensor IoT memantau kondisi dan kinerja peralatan, memungkinkan strategi pemeliharaan prediktif yang mengurangi waktu henti dan memperpanjang umur aset. PLC berkomunikasi dengan perangkat IoT melalui internet, memungkinkan operator untuk memantau dan mengontrol proses industri, peralatan, dan fasilitas dari jarak jauh, kapan saja dan di mana saja. Sistem PLC yang didukung IoT mengoptimalkan penggunaan energi dengan memantau konsumsi energi, mengidentifikasi ketidakefisienan energi, dan menerapkan strategi respons permintaan untuk mengurangi biaya dan dampak lingkungan. Sensor IoT melacak tingkat persediaan, memantau operasi logistik, dan memberikan visibilitas *real-time* ke dalam proses rantai pasok, memungkinkan optimasi persediaan, optimasi rute, dan peramalan permintaan. Sistem PLC yang didukung IoT memantau parameter produksi, mendeteksi cacat secara *real-time*, dan menerapkan strategi kontrol loop tertutup untuk memastikan kualitas dan konsistensi produk dalam operasi manufaktur [63, 64].

Manfaat Sistem PLC yang Didukung IoT

Integrasi teknologi IoT dengan PLC menawarkan beberapa manfaat, termasuk efisiensi operasional yang meningkat, analitik data yang ditingkatkan, fleksibilitas dan skalabilitas yang meningkat, penghematan biaya, serta keselamatan dan kepatuhan yang lebih baik. Sistem PLC yang didukung IoT mengoptimalkan proses industri, meningkatkan kinerja peralatan, dan merampingkan otomatisasi alur kerja, meningkatkan efisiensi operasional dan produktivitas secara keseluruhan. Sensor IoT menyediakan aliran data yang kaya untuk analitik, memungkinkan wawasan *real-time*, analitik prediktif, dan rekomendasi preskriptif untuk mengoptimalkan operasi industri dan pengambilan keputusan. Sistem PLC yang didukung IoT fleksibel dan skalabel, memungkinkan integrasi yang mudah dengan sistem otomatisasi yang ada, serta penambahan sensor, aktuator, dan perangkat

baru untuk memenuhi kebutuhan bisnis yang berkembang. Sistem PLC yang didukung IoT mengurangi biaya pemeliharaan, meminimalkan waktu henti, dan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya, menghasilkan penghematan biaya yang signifikan bagi organisasi industri di berbagai sektor. Sistem PLC yang didukung IoT meningkatkan keselamatan di tempat kerja dengan memantau kondisi berbahaya, menerapkan protokol keselamatan, dan memastikan kepatuhan terhadap peraturan di lingkungan industri [65, 66].

Arah Masa Depan Teknologi PLC yang Didukung IoT

Evolusi teknologi PLC yang didukung IoT diharapkan akan terus berlanjut, dengan kemajuan di bidang komputasi tepi, AI, keamanan siber, dan standar interoperabilitas. Kemampuan komputasi tepi akan ditingkatkan untuk mendukung pemrosesan data *real-time*, analitik, dan pengambilan keputusan di tepi jaringan, mengurangi latensi dan kebutuhan bandwidth untuk sistem PLC yang didukung IoT. Algoritma AI dan ML akan diintegrasikan ke dalam sistem PLC yang didukung IoT untuk memungkinkan pemeliharaan prediktif, deteksi anomali, dan pengambilan keputusan otonom berdasarkan pola dan tren data yang kompleks. Langkah-langkah keamanan siber yang kuat akan diterapkan untuk melindungi sistem PLC yang didukung IoT dari ancaman siber, memastikan integritas, kerahasiaan, dan ketersediaan data di lingkungan industri. Upaya standarisasi akan fokus pada standar dan protokol interoperabilitas untuk integrasi dan komunikasi yang mulus antara perangkat IoT, PLC, dan platform cloud, memungkinkan fleksibilitas dan kompatibilitas yang lebih besar dalam ekosistem otomatisasi industri yang didukung IoT [67, 68].

B. Kecerdasan Artificial dan Pembelajaran Mesin: Implementasi AI dalam Sistem Kontrol Berbasis PLC

Teknologi AI dan ML merevolusi otomatisasi industri dengan memungkinkan sistem kontrol berbasis PLC untuk beradaptasi, belajar, dan mengoptimalkan kinerja secara otonom. Bagian ini mengeksplorasi implementasi teknik AI dan ML dalam sistem kontrol berbasis PLC, memanfaatkan wawasan berbasis data dan analitik prediktif untuk meningkatkan efisiensi operasional, deteksi kesalahan, dan pengambilan keputusan dalam proses industri.

Ikhtisar AI dan ML dalam Sistem Kontrol Berbasis PLC

Algoritma AI dan ML diintegrasikan ke dalam sistem kontrol berbasis PLC untuk menganalisis sejumlah besar data sensor, catatan historis, dan variabel proses, memungkinkan pemantauan *real-time*, pemeliharaan prediktif, dan kontrol adaptif di lingkungan industri. PLC berfungsi sebagai tulang punggung komputasi untuk menerapkan model AI dan ML, mengeksekusi strategi kontrol, dan berinteraksi dengan sensor, aktuator, dan jaringan komunikasi [69, 70].

Komponen Utama Sistem PLC yang Didukung AI

Sistem PLC yang didukung AI terdiri dari beberapa komponen utama, termasuk akuisisi data sensor, prapemrosesan data, rekayasa fitur, pelatihan dan penerapan model, serta loop umpan balik. PLC mengumpulkan data sensor dari peralatan industri, mesin, dan proses, menangkap pengukuran *real-time* dari variabel fisik seperti suhu, tekanan, laju aliran, dan getaran. Algoritma AI memproses data sensor untuk menghilangkan noise, menangani nilai yang hilang, dan menormalisasi data untuk analisis, memastikan kualitas dan konsistensi data untuk pelatihan dan inferensi model ML. Insinyur mengekstrak fitur relevan dari data sensor, seperti metrik statistik, pola deret waktu, dan karakteristik domain frekuensi, untuk menangkap wawasan yang bermakna dan input untuk pengembangan model ML. Model AI dan ML dilatih menggunakan data historis untuk mempelajari pola, korelasi, dan anomali dalam proses industri, sebelum diterapkan pada PLC untuk inferensi dan kontrol *real-time*. Sistem PLC yang didukung AI menggabungkan mekanisme umpan balik untuk terus mengevaluasi kinerja model, memperbarui parameter model, dan mengadaptasi strategi kontrol berdasarkan kondisi proses dan tujuan kinerja yang berubah [71, 72].

Aplikasi Sistem PLC yang Didukung AI

Sistem PLC yang didukung AI menemukan aplikasi di berbagai industri dan domain, termasuk pemeliharaan prediktif, deteksi anomali, kontrol adaptif, dan jaminan kualitas. Algoritma AI menganalisis data sensor untuk memprediksi kegagalan peralatan, mengidentifikasi kebutuhan pemeliharaan, dan menjadwalkan aktivitas pemeliharaan proaktif, mengurangi waktu henti dan biaya pemeliharaan. Model ML mendeteksi anomali dan penyimpangan dari kondisi operasi normal dalam proses industri, memungkinkan peringatan dini, analisis akar penyebab, dan

tindakan korektif untuk mencegah kegagalan sistem dan cacat kualitas. Algoritma kontrol berbasis AI menyesuaikan parameter proses, setpoint, dan strategi kontrol secara *real-time* untuk mengoptimalkan kinerja, meningkatkan efisiensi energi, dan mencapai target produksi dalam lingkungan yang dinamis dan tidak pasti. Model ML menganalisis data sensor untuk mengidentifikasi cacat produk, mengklasifikasikan tingkat kualitas produk, dan mengoptimalkan proses produksi untuk memastikan konsistensi produk dan kepatuhan terhadap standar kualitas [73].

Manfaat Sistem PLC yang Didukung AI

Integrasi teknologi AI dan ML dengan sistem kontrol berbasis PLC menawarkan beberapa manfaat, termasuk kemampuan prediktif yang ditingkatkan, kinerja yang dioptimalkan, waktu henti yang berkurang, keselamatan yang lebih baik, dan peningkatan berkelanjutan. Sistem PLC yang didukung AI menyediakan analitik prediktif dan wawasan lanjutan, memungkinkan pengambilan keputusan proaktif, pemeliharaan preventif, dan mitigasi risiko dalam operasi industri. Algoritma AI mengoptimalkan parameter proses, strategi kontrol, dan operasi peralatan untuk memaksimalkan efisiensi, produktivitas, dan pemanfaatan sumber daya, yang mengarah pada peningkatan kinerja operasional dan daya saing. Sistem PLC yang didukung AI meminimalkan waktu henti yang tidak terencana dengan memprediksi kegagalan peralatan, mendiagnosis akar penyebab, dan menjadwalkan aktivitas pemeliharaan secara proaktif, meminimalkan gangguan pada jadwal produksi dan aliran pendapatan. Model ML menganalisis data yang kritis terhadap keselamatan untuk mengidentifikasi potensi bahaya, menilai tingkat risiko, dan menerapkan protokol dan kontrol keselamatan untuk melindungi pekerja, peralatan, dan lingkungan dari kecelakaan dan insiden. Sistem PLC yang didukung AI memfasilitasi peningkatan berkelanjutan dan inovasi dengan menyediakan wawasan yang dapat ditindaklanjuti, mengoptimalkan proses, dan mendorong budaya pengambilan keputusan dan pengoptimalan yang berbasis data dalam organisasi industri [74].

Arah Masa Depan Teknologi PLC yang Didukung AI

Evolusi teknologi PLC yang didukung AI diharapkan akan terus berlanjut, dengan kemajuan di bidang pembelajaran mendalam, AI tepi, AI yang dapat dijelaskan, dan kolaborasi manusia-AI.

Teknik pembelajaran mendalam, seperti jaringan saraf konvolusional (CNN) dan jaringan saraf rekursif (RNN), akan diterapkan pada sistem kontrol berbasis PLC untuk menangani pola data yang kompleks, dinamika temporal, dan hubungan nonlinier dalam proses industri. Kemampuan AI tepi akan ditingkatkan untuk memungkinkan inferensi dan pengambilan keputusan *real-time* pada PLC, mengurangi ketergantungan pada sumber daya komputasi cloud dan meningkatkan responsivitas serta skalabilitas dalam otomatisasi industri yang didukung AI. Teknik AI yang dapat dijelaskan akan dikembangkan untuk menyediakan wawasan yang transparan dan dapat diinterpretasikan terhadap prediksi dan keputusan model AI, meningkatkan kepercayaan, keandalan, dan kepatuhan regulasi dalam sistem PLC yang didukung AI. Kerangka kerja kolaborasi manusia-AI akan dibangun untuk memfasilitasi sinergi antara operator manusia dan algoritma AI, memanfaatkan keahlian dan intuisi manusia untuk melengkapi otomatisasi dan pengambilan keputusan yang didorong oleh AI dalam pengaturan industri.

C. Keamanan Siber: Tantangan dan Solusi dalam Melindungi PLC dari Ancaman Siber

Keamanan siber telah menjadi perhatian utama dalam otomatisasi industri, terutama dengan meningkatnya konektivitas dan digitalisasi sistem kontrol berbasis PLC. Bagian ini mengeksplorasi tantangan yang dihadapi oleh ancaman siber terhadap PLC dan membahas potensi solusi serta praktik terbaik untuk meningkatkan keamanan siber di lingkungan industri [75-77].

Ikhtisar Risiko Keamanan Siber untuk PLC

PLC rentan terhadap berbagai ancaman siber, termasuk serangan malware, akses tidak sah, serangan *Denial-of-Service* (DoS), manipulasi data, dan kerusakan fisik. Malware seperti virus, worm, dan ransomware dapat menginfeksi PLC, mengganggu operasi, serta mengkompromikan integritas dan keamanan sistem. Akses tidak sah oleh peretas melalui kata sandi yang lemah, koneksi jaringan yang tidak aman, atau kerentanan perangkat lunak dapat mengakibatkan kontrol dan manipulasi proses industri tanpa izin. Serangan DoS dapat membanjiri PLC dengan lalu lintas jaringan yang berlebihan atau permintaan jahat, menyebabkan perlambatan sistem, gangguan, atau respons yang tidak efektif. Penyerang juga dapat memanipulasi data, perintah, atau firmware PLC, yang mengarah pada kontrol proses yang salah,

kesalahan produksi, atau kerusakan peralatan. Selain itu, akses fisik ke PLC dapat memungkinkan penyerang untuk merusak komponen perangkat keras, memasang perangkat berbahaya, atau mengkompromikan integritas sistem melalui manipulasi fisik.

Tantangan Utama Keamanan Siber untuk PLC

Keamanan siber untuk PLC menghadapi beberapa tantangan, termasuk sistem lama, keterhubungan, keterbatasan sumber daya, dan kurangnya kesadaran. Banyak PLC di lingkungan industri merupakan sistem lama dengan firmware yang usang, fitur keamanan terbatas, dan kerentanan bawaan yang membuatnya rentan terhadap serangan siber. Keterhubungan PLC dengan perangkat industri lainnya, sistem kontrol, dan jaringan perusahaan meningkatkan permukaan serangan dan kompleksitas pertahanan keamanan siber. Keterbatasan sumber daya PLC, seperti kemampuan komputasi, memori, dan daya pemrosesan yang terbatas, membatasi penerapan langkah-langkah keamanan yang kuat dan protokol enkripsi. Selain itu, banyak organisasi industri kurang memiliki kesadaran tentang risiko keamanan siber dan praktik terbaik untuk mengamankan PLC, yang menyebabkan investasi yang tidak memadai dalam langkah-langkah keamanan siber dan pelatihan untuk personel.

Solusi untuk Meningkatkan Keamanan Siber PLC

Untuk mengurangi risiko keamanan siber pada PLC, organisasi industri dapat menerapkan berbagai solusi dan praktik terbaik. Segmentasi jaringan, misalnya, memisahkan jaringan industri ke dalam zona-zona dan menerapkan firewall, kontrol akses, serta sistem deteksi intrusi (IDS) untuk membatasi komunikasi dan mengisolasi PLC dari ancaman eksternal. Penerapan mekanisme otentikasi yang kuat, seperti otentikasi multi-faktor (MFA) dan otentikasi berbasis sertifikat, dapat mencegah akses tidak sah ke PLC dan sistem kontrol. Memperbarui firmware dan perangkat lunak PLC secara teratur dengan patch keamanan terbaru, pembaruan, dan perbaikan untuk menangani kerentanan yang diketahui serta vektor eksploitasi juga sangat penting. Selain itu, enkripsi komunikasi PLC, penerapan protokol aman (misalnya, TLS/SSL), serta pemeriksaan integritas data (misalnya, tanda tangan digital, checksum) membantu melindungi kerahasiaan dan integritas data. Penerapan kebijakan kontrol akses, kontrol akses berbasis peran (RBAC), dan prinsip hak minimum membatasi izin pengguna dan

membatasi akses ke fungsi serta sumber daya PLC yang sensitif. Program pelatihan dan kesadaran keamanan siber bagi karyawan, kontraktor, dan vendor meningkatkan kesadaran tentang ancaman siber, teknik rekayasa sosial, serta praktik terbaik untuk operasi PLC yang aman. Terakhir, pengembangan dan implementasi rencana tanggap insiden, prosedur, dan protokol untuk mendeteksi, merespons, serta memulihkan dari insiden keamanan siber yang melibatkan PLC memastikan kelangsungan bisnis dan meminimalkan dampak pada operasi [78, 79].

Teknologi yang Muncul untuk Keamanan Siber PLC

Teknologi dan tren baru dalam keamanan siber menawarkan peluang menjanjikan untuk meningkatkan keamanan PLC, termasuk analitik perilaku, perangkat keras yang aman, teknologi blockchain, dan keamanan sistem siber-fisik. Analitik perilaku yang diterapkan dengan teknik ML dapat mendeteksi perilaku anomali, aktivitas mencurigakan, dan ancaman siber secara *real-time*, memungkinkan deteksi dan respons ancaman secara proaktif. Pemanfaatan platform perangkat keras yang aman, seperti *Trusted Platform Modules* (TPM) dan *Hardware Security Modules* (HSM), membantu membangun lingkungan eksekusi yang tepercaya dan melindungi operasi serta data PLC yang sensitif. Eksplorasi penggunaan teknologi blockchain untuk pencatatan yang aman dan transparan, manajemen identitas, serta audit yang tahan gangguan atas transaksi dan interaksi PLC di lingkungan industri menawarkan peningkatan keamanan dan keandalan. Terakhir, integrasi langkah-langkah keamanan siber ke dalam sistem siber-fisik (CPS), termasuk PLC, sensor, aktuator, dan perangkat IoT industri, memastikan keamanan dan ketahanan end-to-end terhadap serangan serta gangguan siber.

V. Studi Kasus

Bagian ini menyajikan studi kasus dunia nyata yang menyoroti aplikasi sukses dari PLC di berbagai sektor industri, menunjukkan fleksibilitas, keandalan, dan efektivitas teknologi PLC dalam mengoptimalkan proses, meningkatkan produktivitas, dan mencapai keunggulan operasional.

A. Studi Kasus Dunia Nyata yang Menunjukkan Aplikasi PLC yang Berhasil di Berbagai Industri

Manufaktur Otomotif: Sistem Produksi Toyota

Sistem Produksi Toyota (Toyota Production System/TPS) terkenal karena penggunaan inovatif PLC dan prinsip-prinsip lean manufacturing untuk mencapai tingkat efisiensi, kualitas, dan fleksibilitas yang tinggi dalam produksi otomotif. PLC mengontrol jalur perakitan robotik, sistem konveyor, dan robot pengelasan, memungkinkan produksi just-in-time (JIT), penjadwalan kanban, dan praktik perbaikan berkelanjutan di fasilitas manufaktur Toyota di seluruh dunia.

Pengolahan Makanan dan Minuman: Pabrik Pembotolan Coca-Cola

Pabrik pembotolan Coca-Cola memanfaatkan sistem kontrol berbasis PLC untuk mengotomatisasi dan mengoptimalkan produksi, pengemasan, dan distribusi minuman, memastikan konsistensi, kualitas, dan kepatuhan terhadap standar regulasi. PLC mengontrol peralatan pencampuran, pengisian, pelabelan, dan pengemasan, memungkinkan produksi berkecepatan tinggi, manajemen resep, dan pemantauan *real-time* metrik produksi di pabrik pengolahan Coca-Cola secara global.

Manufaktur Farmasi: Produksi Vaksin Pfizer

Fasilitas produksi vaksin Pfizer mengandalkan PLC untuk kontrol dan pemantauan yang tepat dari bioreaktor, tangki fermentasi, dan sistem pemurnian yang digunakan dalam proses manufaktur vaksin. Sistem kontrol berbasis PLC memastikan kepatuhan terhadap persyaratan regulasi yang ketat, ketelusuran batch, dan langkah-langkah jaminan kualitas, memungkinkan Pfizer memproduksi vaksin yang aman dan efektif untuk distribusi global.

Pembangkit Listrik: Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit listrik tenaga surya menggunakan PLC untuk memantau dan mengendalikan susunan fotovoltaik (PV), inverter, dan sistem penyimpanan energi, mengoptimalkan pembangkit listrik, integrasi jaringan, dan operasi pemeliharaan. Sistem kontrol berbasis PLC memungkinkan pelacakan *real-time* iradiasi matahari, regulasi tegangan, dan deteksi kesalahan, memastikan kinerja dan keandalan optimal pembangkit listrik tenaga surya dalam berbagai kondisi lingkungan.

Manufaktur Dirgantara: Produksi Pesawat Terbang Boeing

Fasilitas produksi pesawat terbang Boeing mengandalkan PLC untuk kontrol presisi dari pusat pemesinan, jalur perakitan robotik, dan sistem

inspeksi kualitas yang digunakan dalam proses produksi pesawat. Sistem kontrol berbasis PLC memungkinkan fabrikasi, perakitan, dan pengujian otomatis dari bagian-bagian pesawat, memastikan kepatuhan terhadap standar kedirgantaraan yang ketat dan menghasilkan pesawat berkualitas tinggi untuk pelanggan di seluruh dunia.

Penambangan dan Ekstraksi Sumber Daya: Operasi Penambangan Rio Tinto

Operasi penambangan Rio Tinto memanfaatkan sistem kontrol berbasis PLC untuk peralatan pengeboran, pengangkutan, dan penanganan material otonom yang digunakan dalam operasi penambangan terbuka dan bawah tanah. PLC memungkinkan optimalisasi *real-time* dari proses produksi, pemanfaatan aset, dan sistem keselamatan, meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan dalam operasi penambangan Rio Tinto di berbagai benua.

Pengolahan Air dan Air Limbah: Pabrik Reklamasi Air PUB Singapura

Pabrik reklamasi air PUB Singapura menggunakan PLC untuk kontrol proses canggih dan optimalisasi di pabrik reklamasi air, memastikan pengolahan air limbah yang andal dan berkelanjutan untuk digunakan kembali dan pembuangan. Sistem kontrol berbasis PLC memantau parameter kualitas air, mengatur dosis kimia, dan mengoptimalkan konsumsi energi, memungkinkan PUB memenuhi standar kualitas air yang ketat dan regulasi lingkungan.

Transportasi dan Logistik: Pusat Penyortiran Paket FedEx

Pusat penyortiran paket FedEx menggunakan PLC untuk penanganan, penyortiran, dan pengaturan otomatis paket, memungkinkan pengiriman cepat dan akurat ke tujuan di seluruh dunia. Sistem kontrol berbasis PLC mengelola sabuk konveyor, pemindai barcode, dan mesin penyortir robotik, memfasilitasi pemrosesan pesanan yang efisien, pelacakan pengiriman, dan layanan pelanggan di pusat logistik FedEx secara global.

Sistem Energi Terbarukan: Ladang Turbin Angin Vestas

Ladang turbin angin Vestas memanfaatkan sistem kontrol berbasis PLC untuk pemantauan dan kontrol jarak jauh dari turbin angin, sistem pitch, dan konverter daya, mengoptimalkan produksi energi dan integrasi jaringan. PLC memungkinkan pemantauan kondisi *real-time*, pemeliharaan prediktif, dan deteksi kesalahan, memastikan

operasi yang andal dan hemat biaya dari ladang turbin angin dalam berbagai kondisi angin.

Kota Pintar: Sistem Manajemen Lalu Lintas Siemens

Sistem manajemen lalu lintas Siemens memanfaatkan PLC untuk kontrol cerdas dari sinyal lalu lintas, tanda pesan variabel, dan kamera pemantauan lalu lintas, mengoptimalkan aliran lalu lintas dan keselamatan di lingkungan perkotaan. Sistem kontrol berbasis PLC memungkinkan penyesuaian waktu sinyal, manajemen kemacetan, dan koordinasi tanggap darurat, meningkatkan mobilitas dan kualitas hidup di kota-kota pintar yang dilengkapi dengan solusi lalu lintas Siemens.

B. Analisis Dampak Implementasi PLC terhadap Efisiensi dan Produktivitas

Bagian ini melakukan analisis dampak implementasi PLC terhadap efisiensi dan produktivitas berdasarkan studi kasus yang telah disajikan sebelumnya. Analisis ini mengevaluasi manfaat nyata dan peningkatan kinerja yang dicapai melalui adopsi teknologi PLC di berbagai industri, menyoroti faktor pendorong utama dan faktor keberhasilan yang berkontribusi pada hasil operasional yang lebih baik.

Peningkatan Efisiensi

Penerapan teknologi PLC telah menghasilkan peningkatan efisiensi yang signifikan bagi organisasi di berbagai sektor industri. Penggunaan PLC telah berhasil mengurangi waktu henti dengan meminimalkan downtime yang tidak terencana. Hal ini dicapai melalui pemeliharaan prediktif, pemantauan *real-time*, dan deteksi kesalahan secara proaktif, yang meningkatkan keandalan dan ketersediaan peralatan. Selain itu, PLC memperlancar alur kerja produksi dengan menghilangkan tugas manual dan menyinkronkan operasi di berbagai mesin dan stasiun kerja. Hasilnya adalah pengurangan waktu siklus, waktu tunggu, dan kemacetan produksi yang secara signifikan meningkatkan efisiensi. Tidak hanya itu, sistem yang dikendalikan oleh PLC juga mengoptimalkan penggunaan energi. Dengan mengatur operasi peralatan dan menerapkan strategi hemat energi, PLC membantu mengurangi konsumsi energi, menurunkan biaya operasional, dan mendukung keberlanjutan lingkungan. Pemanfaatan sumber daya juga meningkat dengan adanya otomasi berbasis PLC. Sistem ini memaksimalkan penggunaan bahan baku, tenaga kerja, dan peralatan dengan mengoptimalkan jadwal produksi, meminimalkan limbah, dan

meningkatkan efisiensi sumber daya secara keseluruhan [80, 81].

Peningkatan Produktivitas

Implementasi teknologi PLC juga telah menghasilkan peningkatan produktivitas yang signifikan. Proses yang dikendalikan oleh PLC mencapai throughput yang lebih tinggi, volume produksi yang lebih besar, dan kapasitas output yang lebih tinggi melalui operasi yang berkesinambungan, alur kerja yang dioptimalkan, dan pengurangan waktu pengaturan. Otomasi berbasis PLC memastikan kualitas produk yang konsisten dengan tingkat akurasi yang tinggi dan kepatuhan terhadap spesifikasi yang ketat. Hal ini dicapai melalui penerapan kontrol loop tertutup, langkah-langkah jaminan kualitas, dan pemantauan proses secara *real-time*. Selain itu, sistem PLC menyediakan fleksibilitas dan skalabilitas yang memungkinkan perusahaan untuk beradaptasi dengan perubahan kebutuhan produksi, permintaan pelanggan, dan dinamika pasar. Sistem ini memungkinkan rekonfigurasi cepat, kustomisasi produk, dan perluasan kemampuan manufaktur. Efisiensi tenaga kerja juga meningkat dengan otomasi PLC, yang mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual, mengotomatisasi tugas-tugas berulang, dan meningkatkan produktivitas tenaga kerja dengan mengalokasikan sumber daya manusia untuk kegiatan bernilai tambah, tugas-tugas terampil, dan peran pengambilan keputusan [82, 83].

Faktor Keberhasilan Utama

Keberhasilan implementasi PLC dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas sangat bergantung pada beberapa faktor kunci. Perencanaan strategis yang jelas dengan tujuan yang terdefinisi, keselarasan pemangku kepentingan, dan perencanaan yang komprehensif sangat penting untuk keberhasilan penerapan dan integrasi PLC ke dalam proses dan sistem yang ada. Selain itu, keahlian teknis juga memainkan peran penting. Personel yang terampil dengan keahlian dalam pemrograman, konfigurasi, dan pemeliharaan PLC sangat penting untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengoptimalkan sistem kontrol berbasis PLC untuk mencapai tujuan kinerja. Budaya peningkatan berkelanjutan, inovasi, dan pembelajaran juga diperlukan untuk memaksimalkan manfaat teknologi PLC melalui optimisasi berkelanjutan, adaptasi, dan penyempurnaan strategi kontrol dan proses

operasional. Terakhir, kolaborasi dengan vendor PLC, integrator sistem, dan mitra industri sangat penting untuk berbagi pengetahuan, pertukaran praktik terbaik, dan akses ke teknologi mutakhir, yang semuanya dapat meningkatkan efektivitas dan daya saing implementasi PLC [8].

VI. Tantangan dan Tren Masa Depan

A. Tantangan yang Dihadapi dalam

Implementasi dan Pengembangan PLC

Meskipun banyak manfaat dan kemajuan dalam teknologi PLC, organisasi menghadapi beberapa tantangan dalam implementasi dan pengembangan PLC. Tantangan-tantangan ini dapat menghambat efektivitas, efisiensi, dan skalabilitas sistem otomatisasi berbasis PLC, sehingga memerlukan pertimbangan yang cermat dan strategi mitigasi yang tepat [84, 85].

Kompleksitas Integrasi Sistem

Salah satu tantangan utama dalam implementasi PLC adalah kompleksitas integrasi PLC dengan sistem otomatisasi yang ada, peralatan lama, dan infrastruktur TI perusahaan. Masalah kompatibilitas, keterbatasan interoperabilitas, dan protokol komunikasi mungkin muncul, memerlukan perencanaan, pengujian, dan kustomisasi yang ekstensif untuk memastikan integrasi yang mulus dan pertukaran data antara sistem yang heterogen.

Kesenjangan Keterampilan dan Kebutuhan Pelatihan

Evolusi cepat teknologi PLC membutuhkan pengembangan keterampilan dan pelatihan berkelanjutan bagi para insinyur, teknisi, dan operator untuk mengikuti tren, alat, dan teknik yang muncul. Namun, organisasi sering menghadapi tantangan dalam merekrut, mempertahankan, dan meningkatkan keterampilan personel dengan pengetahuan dan keahlian yang diperlukan dalam pemrograman, pemecahan masalah, dan pemeliharaan PLC, yang mengakibatkan kekurangan keterampilan dan kesenjangan kompetensi.

Risiko Keamanan dan Keamanan Siber

PLC rentan terhadap ancaman keamanan siber, termasuk serangan malware, akses tidak sah, dan pelanggaran data, yang menimbulkan risiko signifikan terhadap keselamatan operasional, integritas, dan kerahasiaan. Mengamankan PLC dari ancaman siber memerlukan langkah-langkah keamanan siber yang kuat, seperti segmentasi

jaringan, kontrol akses, enkripsi, dan sistem deteksi intrusi, namun banyak organisasi kesulitan untuk mengimplementasikan dan memelihara pertahanan keamanan siber yang efektif karena keterbatasan sumber daya dan kompleksitas teknis.

Keterbatasan Skalabilitas dan Fleksibilitas

Skalabilitas dan fleksibilitas adalah pertimbangan penting dalam pengembangan dan penerapan PLC, terutama ketika organisasi berupaya menyesuaikan diri dengan perubahan kebutuhan bisnis, permintaan pasar, dan kemajuan teknologi. Namun, sistem PLC lama mungkin tidak memiliki skalabilitas dan fleksibilitas yang dibutuhkan untuk mengakomodasi perubahan volume produksi, variasi produk, dan konfigurasi proses, yang membatasi kelincahan dan inovasi dalam otomatisasi industri.

Pertimbangan Biaya dan Pengembalian Investasi (ROI)

Biaya awal yang terkait dengan akuisisi, penerapan, dan integrasi PLC bisa sangat besar, terutama bagi usaha kecil dan menengah (UKM) dengan anggaran modal dan sumber daya finansial yang terbatas. Menghitung pengembalian investasi (ROI) untuk proyek PLC memerlukan analisis biaya-manfaat yang cermat, perbandingan kinerja, dan penilaian risiko untuk membenarkan investasi, memprioritaskan inisiatif, dan memaksimalkan nilai yang dihasilkan dari implementasi PLC.

Pemeliharaan dan Manajemen Siklus Hidup

PLC memiliki masa pakai terbatas dan memerlukan pemeliharaan rutin, peningkatan, dan manajemen siklus hidup untuk memastikan keandalan, kinerja, dan kepatuhan terhadap standar industri. Namun, pemeliharaan PLC lama bisa menjadi tantangan karena komponen yang usang, dukungan yang dihentikan, dan ketergantungan pada vendor, sehingga memerlukan perencanaan proaktif, manajemen suku cadang, dan strategi pembaruan teknologi untuk mengurangi risiko dan menghindari keusangan sistem.

Kepatuhan Regulasi dan Kepatuhan terhadap Standar

Kepatuhan terhadap persyaratan regulasi, standar industri, dan regulasi keselamatan adalah hal yang sangat penting dalam pengembangan dan penerapan PLC, terutama di sektor-sektor yang sangat diatur seperti perawatan kesehatan, dirgantara, dan energi nuklir. Memastikan kepatuhan terhadap standar seperti ISO 13485, IEC

61508, dan NIST SP 800-82 memerlukan proses dokumentasi, pengujian, dan validasi yang ketat, namun mencapai dan mempertahankan kepatuhan regulasi dapat memakan banyak sumber daya dan waktu bagi organisasi.

Interoperabilitas dan Ketergantungan pada Vendor

Tantangan interoperabilitas dan masalah ketergantungan pada vendor dapat muncul ketika mengintegrasikan PLC dari berbagai produsen atau mengandalkan perangkat lunak, protokol, atau antarmuka milik. Standar yang interoperabel, solusi sumber terbuka, dan arsitektur modular dapat mengurangi risiko interoperabilitas dan ketergantungan pada vendor, namun organisasi harus hati-hati mengevaluasi hubungan dengan vendor, perjanjian lisensi, dan peta jalan teknologi untuk meminimalkan ketergantungan dan memastikan fleksibilitas dan kompatibilitas jangka panjang.

B. Tren Masa Depan dan Inovasi yang Diharapkan dalam Teknologi PLC

Seiring dengan perkembangan PLC yang terus berlanjut dalam menghadapi tantangan dan kemajuan teknologi, beberapa tren masa depan dan inovasi diharapkan akan membentuk lanskap teknologi PLC. Tren-tren ini berpotensi mendorong inovasi, meningkatkan kinerja, dan mengatasi tantangan utama dalam sistem otomatisasi dan kontrol industri.

Integrasi dengan Industrial IoT (IIoT)

Integrasi PLC dengan platform *Industrial Internet of Things* (IIoT) dan jaringan sensor diharapkan dapat merevolusi otomatisasi industri dengan memungkinkan akuisisi data secara *real-time*, analitik, dan pengambilan keputusan. PLC yang terintegrasi dengan IIoT dapat mengumpulkan, memproses, dan mentransmisikan data sensor dari perangkat yang terhubung, memungkinkan pemeliharaan prediktif, pemantauan jarak jauh, dan optimalisasi aset di pabrik pintar dan lingkungan industri.

Edge Computing dan Kecerdasan Edge

Teknologi edge computing, seperti gateway edge dan perangkat edge, diperkirakan akan memainkan peran penting dalam sistem kontrol berbasis PLC dengan memungkinkan pemrosesan data, analitik, dan kontrol secara *real-time* di tepi jaringan. Kemampuan kecerdasan edge memberdayakan PLC untuk melakukan analitik lanjutan, pembelajaran mesin, dan pengambilan

keputusan secara lokal, mengurangi latensi, penggunaan bandwidth, dan ketergantungan pada layanan cloud untuk aplikasi kontrol kritis.

igital Twins dan Virtualisasi

Adopsi teknologi digital twin bersama dengan PLC memungkinkan pemodelan virtual, simulasi, dan optimalisasi proses fisik, peralatan, dan sistem. Digital twin mereplikasi perilaku dan kinerja aset yang dikontrol PLC dalam lingkungan virtual, memungkinkan operator untuk memvisualisasikan, menganalisis, dan mengoptimalkan proses produksi, strategi pemeliharaan prediktif, dan langkah-langkah efisiensi energi secara *real-time*.

Integrasi Sistem Fisik-Siber (CPS)

Konvergensi PLC dengan Sistem Fisik-Siber (CPS) memfasilitasi integrasi yang mulus antara proses fisik dan sistem kontrol digital, memungkinkan operasi otonom, kontrol adaptif, dan optimalisasi diri dalam lingkungan industri yang kompleks. PLC berbasis CPS memanfaatkan data sensor *real-time*, algoritma AI, dan mekanisme aktuasi untuk mencapai keterkaitan erat antara proses fisik dan tindakan kontrol, meningkatkan kelincahan, ketahanan, dan responsivitas dalam otomatisasi industri.

Augmented Reality (AR) dan Virtual Reality (VR)

Integrasi teknologi AR dan VR dengan sistem kontrol berbasis PLC meningkatkan pelatihan operator, prosedur pemeliharaan, dan alur kerja pemecahan masalah di lingkungan industri. Antarmuka AR/VR menampilkan informasi digital, instruksi, dan simulasi pada peralatan dan lingkungan fisik, memberdayakan operator untuk memvisualisasikan, berinteraksi dengan, dan memanipulasi sistem yang dikontrol PLC dengan cara yang imersif dan intuitif, meningkatkan kesadaran situasional dan pengambilan keputusan.

Quantum Computing dan Quantum PLC

Munculnya komputasi kuantum menjanjikan revolusi dalam teknologi PLC dengan memungkinkan PLC kuantum yang mampu menyelesaikan masalah optimasi, kontrol, dan simulasi yang kompleks dengan kecepatan dan efisiensi yang belum pernah terjadi sebelumnya. PLC kuantum memanfaatkan algoritma kuantum, qubit, dan teknik annealing kuantum untuk mengatasi optimasi kombinatorial, pembelajaran mesin, dan tugas kriptografi, membuka perbatasan baru dalam otomatisasi dan kontrol industri.

Teknologi Berkelanjutan dan Hijau

Peralihan menuju teknologi berkelanjutan dan hijau dalam pengembangan PLC menekankan efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan, dan pengurangan jejak karbon dalam solusi otomatisasi industri. PLC dengan fitur ramah lingkungan, seperti konsumsi daya rendah, integrasi energi terbarukan, dan manajemen energi prediktif, memungkinkan organisasi untuk meminimalkan dampak lingkungan, mematuhi persyaratan regulasi, dan mencapai tujuan keberlanjutan sambil mengoptimalkan kinerja operasional.

C. Peran PLC dalam Masa Depan Industri 4.0 dan Otomatisasi Cerdas

Seiring dengan perubahan transformasional yang terus berlangsung di lanskap industri yang didorong oleh digitalisasi, konektivitas, dan otomatisasi, PLC siap memainkan peran sentral dalam membentuk masa depan Industri 4.0 dan otomatisasi cerdas. Konvergensi teknologi PLC dengan tren dan teknologi yang sedang berkembang diperkirakan akan membuka era baru dalam manufaktur cerdas, produksi adaptif, dan ekosistem yang terhubung [6, 86].

Memungkinkan Konektivitas dan Interoperabilitas

PLC berfungsi sebagai tulang punggung sistem yang saling terhubung dan interoperabel di lingkungan Industri 4.0, memfasilitasi komunikasi yang lancar, pertukaran data, dan integrasi di berbagai perangkat, mesin, dan platform. Dengan memanfaatkan protokol komunikasi standar seperti OPC UA, MQTT, dan Ethernet/IP, PLC memungkinkan konektivitas plug-and-play, interoperabilitas antar vendor, dan berbagi data secara *real-time* di pabrik pintar dan rantai pasokan digital.

Memberdayakan Pengambilan Keputusan Berbasis Data

PLC bertindak sebagai pusat akuisisi dan pemrosesan data, menangkap data sensor, metrik mesin, dan wawasan produksi dari rantai produksi dan mengubahnya menjadi intelijen yang dapat ditindaklanjuti bagi para pengambil keputusan. Dengan kemampuan analitik lanjutan, algoritma pembelajaran mesin, dan pemodelan prediktif, PLC memungkinkan pemantauan, analisis, dan optimalisasi *real-time* dari proses manufaktur, kinerja peralatan, dan operasi rantai pasokan, memberdayakan organisasi untuk membuat keputusan berbasis data dan mendorong perbaikan berkelanjutan.

Memfasilitasi Manufaktur Adaptif dan Lincah

PLC mendukung strategi manufaktur adaptif dan lincah dengan memungkinkan sistem produksi yang fleksibel, dapat dikonfigurasi ulang, dan didorong oleh permintaan yang dapat merespons dengan cepat kondisi pasar yang berubah, preferensi pelanggan, dan persyaratan produksi. Melalui pemrograman modular, arsitektur kontrol terdistribusi, dan kemampuan konfigurasi ulang cepat, sistem otomatisasi berbasis PLC memungkinkan produksi tepat waktu, kustomisasi massal, dan pengambilan keputusan terdesentralisasi, meningkatkan kelincahan, ketahanan, dan daya saing dalam lingkungan bisnis yang dinamis.

Mendorong Kolaborasi Manusia-Mesin

PLC memfasilitasi kolaborasi manusia-mesin dengan meningkatkan kemampuan manusia dengan solusi otomatisasi cerdas, robotika, dan cobotika yang meningkatkan produktivitas, keselamatan, dan ergonomi di tempat kerja industri. Robot kolaboratif (cobot) yang dikendalikan oleh PLC dapat bekerja bersama operator manusia, membantu dalam tugas-tugas berulang, proses perakitan yang kompleks, dan operasi berbahaya sambil memastikan keselamatan, efisiensi, dan interaksi yang mulus antara manusia dan mesin.

Mendukung Keberlanjutan dan Manufaktur Hijau

PLC berkontribusi pada inisiatif keberlanjutan dan manufaktur hijau dengan mengoptimalkan penggunaan energi, meminimalkan limbah, dan mengurangi dampak lingkungan dalam operasi industri. Melalui algoritma kontrol yang efisien energi, strategi pemeliharaan prediktif, dan teknik optimalisasi sumber daya, sistem otomatisasi berbasis PLC memungkinkan organisasi untuk mencapai praktik produksi yang ramah lingkungan, mematuhi standar regulasi, dan memenuhi tujuan keberlanjutan sambil mempertahankan efisiensi operasional dan profitabilitas.

Mendorong Inovasi dan Kemajuan Teknologi

PLC mendorong inovasi dan kemajuan teknologi dengan berfungsi sebagai platform untuk eksperimen, prototipe, dan pengembangan solusi otomatisasi baru, aplikasi IoT, dan layanan digital. Dengan perangkat lunak sumber terbuka, arsitektur perangkat keras modular, dan ekosistem pengembangan kolaboratif, PLC memberdayakan insinyur, peneliti, dan pengusaha untuk

mengeksplorasi kasus penggunaan baru, proyek percontohan, dan teknologi disruptif yang mendorong batas-batas otomatisasi industri dan mendefinisikan ulang masa depan manufaktur.

VII. KESIMPULAN

Tinjauan ini memberikan gambaran komprehensif tentang aplikasi, sejarah, evolusi, tantangan, dan tren masa depan dari PLC dalam sistem otomatisasi industri dan kontrol. Temuan utama dari tinjauan ini menunjukkan bahwa PLC memainkan peran penting dalam berbagai industri, termasuk manufaktur, energi, transportasi, dan pertanian, di mana PLC mengotomatisasi proses, mengoptimalkan alur kerja, dan meningkatkan produktivitas. Dari asal-usulnya sebagai sistem kontrol berbasis relai hingga PLC digital modern dengan fitur-fitur canggih seperti jaringan, kontrol gerak, dan fungsi keselamatan, PLC telah mengalami kemajuan teknologi yang signifikan selama beberapa dekade terakhir.

Meskipun memiliki banyak manfaat, implementasi PLC menghadapi tantangan seperti kompleksitas integrasi sistem, kesenjangan keterampilan, risiko keamanan siber, dan keterbatasan skalabilitas, yang memerlukan perencanaan strategis, kolaborasi, dan inovasi untuk diatasi. Masa depan teknologi PLC ditandai dengan tren seperti integrasi IIoT (Industrial Internet of Things), komputasi edge, digital twins, dan manufaktur berkelanjutan, yang memiliki potensi untuk mendorong inovasi, efisiensi, dan daya saing di lingkungan Industri 4.0.

Temuan dari tinjauan ini memiliki beberapa implikasi penting untuk praktik dan penelitian di bidang sistem otomatisasi industri dan kontrol. Praktisi dapat memanfaatkan teknologi PLC untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan daya saing dalam operasi industri dengan mengatasi tantangan, mengadopsi tren yang muncul, dan merangkul strategi transformasi digital yang disesuaikan dengan kebutuhan industri. Peneliti dapat menjelajahi jalur baru untuk pengembangan, integrasi, dan aplikasi PLC dengan menyelidiki teknologi yang muncul, pendekatan interdisipliner, dan kasus penggunaan spesifik industri yang mendorong batas-batas inovasi dan menangani tantangan kritis dalam otomatisasi industri.

Sebagai kesimpulan, tinjauan ini menegaskan pentingnya PLC sebagai elemen dasar dari sistem otomatisasi dan kontrol industri, dengan menyoroti kesesuaian, evolusi, tantangan, dan tren masa depannya. Dengan memahami implikasi dari tinjauan ini, praktisi dan peneliti dapat menavigasi kompleksitas teknologi PLC dan memanfaatkan

potensinya untuk mendorong pertumbuhan berkelanjutan, inovasi, dan keunggulan dalam Revolusi Industri Keempat dan seterusnya. Berdasarkan temuan dan implikasi tinjauan ini, beberapa rekomendasi untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut tentang PLC muncul.

Penelitian di masa depan harus fokus pada pengembangan solusi keamanan siber yang canggih yang disesuaikan dengan tantangan unik sistem kontrol berbasis PLC, termasuk deteksi anomali, intelijen ancaman, dan prinsip-prinsip keamanan sejak desain untuk mengurangi risiko siber dan memastikan integritas serta ketahanan infrastruktur kritis. Upaya standarisasi perlu dipercepat untuk menetapkan standar interoperabilitas dan protokol yang umum bagi PLC, perangkat IIoT, dan jaringan komunikasi industri, mendorong integrasi yang lancar, pertukaran data, dan kolaborasi di berbagai sistem dan platform yang heterogen.

Penelitian dalam komputasi edge dan kecerdasan edge harus mengeksplorasi arsitektur, algoritma, dan aplikasi baru yang memanfaatkan PLC sebagai node komputasi edge untuk memungkinkan pemrosesan data real-time, analitik, dan pengambilan keputusan di tepi jaringan, meningkatkan responsivitas, skalabilitas, dan otonomi dalam otomatisasi industri. Prinsip-prinsip desain otomatisasi berpusat pada manusia harus diintegrasikan ke dalam proses pengembangan PLC untuk meningkatkan pengalaman pengguna, keterlibatan operator, dan kolaborasi manusia-mesin di tempat kerja industri, memastikan keselamatan, ergonomi, dan kegunaan sistem kontrol berbasis PLC untuk berbagai kelompok pengguna.

Inovasi dalam desain PLC yang hemat energi, integrasi energi terbarukan, dan manajemen energi prediktif dapat berkontribusi pada praktik manufaktur yang berkelanjutan dan pelestarian lingkungan dengan meminimalkan konsumsi energi, mengurangi emisi karbon, dan mempromosikan efisiensi sumber daya dalam operasi industri. Inisiatif sumber terbuka dan upaya pengembangan berbasis komunitas harus didorong untuk mendemokratisasi akses ke teknologi PLC, mendorong kolaborasi, dan mempercepat inovasi dalam otomatisasi industri, memungkinkan berbagi pengetahuan, tinjauan sejawat, dan penggunaan ulang kode di antara praktisi, peneliti, dan penggemar. Upaya penelitian kolaboratif antara akademisi, industri, dan lembaga pemerintah harus dipromosikan untuk mengatasi tantangan yang kompleks dan mengeksplorasi solusi interdisipliner di persimpangan teknologi

PLC, kecerdasan buatan, sistem siber-fisik, dan ilmu keberlanjutan, mendorong pendekatan holistik terhadap otomatisasi dan kontrol industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Zhao and Z. Tao, "Toward Reliable Programmable Logic Controller Function Block Diagrams," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166137-166146, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3133630.
- [2] Ruwanto, D. Ridwan, A. A. Masriwilaga, H. Kabir, D. Komaludin, "Sistem SCADA Implementasi Sistem SCADA Untuk Proses Koagulasi Pada Instalasi Pengolahan Air Berbasis PLC Schneider M221 dan HMI Weintek," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 11, no. 1, pp. 74-83, 2023, doi: 10.34010/TELEKONTRAN.V11I1.10658
- [3] M. Y. Permana, M. R. Taufik, F. F. Ahmad, and M. F. Ibrahim, "Studi Komparasi Beberapa Pengendali untuk Pengontrolan Lampu Lalu Lintas Dua Persimpangan Berdekatan," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 8, no. 1, pp. 42-56, 2020, doi: 10.34010/telekontran.v8i1.3074.
- [4] M. Aria, J. Utama, F. Fauzia, M. Rizal, M. Fahmi, and M. Yudha, "Virtual Simulation System with Various Examples and Analysis Tools for Programmable Logic Controller Training," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 879, no. 1, p. 012108, Jul. 2020, doi: 10.1088/1757-899x/879/1/012108.
- [5] J. Lu, "Application of PLC control technology in intelligent automatic control," 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), Apr. 2022, doi: 10.1109/ipec54454.2022.9777627.
- [6] M. A. Sehr, L. Marten, W. Matther, U. Ines, W. Martin, N. Joerg, dan H. Stephan, "Programmable Logic Controllers in the context of Industry 4.0," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 5, pp. 3523-3533, May 2021, doi: 10.1109/tii.2020.3007764.
- [7] R. M. Levenson, Z. E. Nelson, and A. A. Adegbege, "Programmable logic controller for embedded implementation of input-constrained systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 14412-14417, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2031.
- [8] R. H. H. da Fonseca and F. R. Pinto, "The Importance of the Programmable Logic Controller 'PLC' in the Industry in the Automation Process," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, no. 11, pp. 280-284, Nov. 2019.
- [9] E. S. Simon, S. Rangasamy, N. Boopathy, P. Chinnarasu, and S. Venkatachalam, "Fault detection and Induction motor safety using Programmable Logic Controller and Supervisory Control and Data Acquisition system," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 955, no. 1, p. 012077, Nov. 2020, IOP Publishing.
- [10] J. Y. Chen, K. C. Tai, and G. C. Chen, "Application of programmable logic controller to build-up an intelligent industry 4.0 platform," *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 150-155, 2017.
- [11] Y. J. Lin, C. F. Tan, and C. Y. Huang, "Integration of logic controller with IoT to form a manufacturing edge computing environment: a premise," *Procedia Manufacturing*, vol. 39, pp. 398-405, 2019.
- [12] M. T. Ahammed, C. Das, S. R. Oion, S. Ghosh, and M. Afroj, "Design and implementation of programmable logic controller based automatic transfer switch," in *Journal of Artificial Intelligence, Machine Learning and Neural Network (JAIMLNN)*, vol. 2, no. 2, pp. 41-51, Mar. 2022.
- [13] E. R. Alphonsus and M. O. Abdullah, "A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1185-1205, 2016.
- [14] M. G. Hudedmani, R. M. Umayal, S. K. Kabberalli, and R. Hittalamani, "Programmable logic controller (PLC) in automation," *Advanced Journal of Graduate Research*, vol. 2, no. 1, pp. 37-45, 2017.
- [15] S. A. Namekar and R. Yadav, "Programmable Logic Controller (PLC) and its applications," *International Journal of Innovative Research in Technology (IJIRT)*, vol. 6, no. 11, pp. 372-376, 2020.
- [16] Z. Wang, Y. Zhang, Y. Chen, H. Liu, B. Wang, and C. Wang, "A Survey on Programmable Logic Controller Vulnerabilities, Attacks, Detections, and Forensics," *Processes*, vol. 11, no. 3, p. 918, 2023.
- [17] A. Serhane, M. Raad, R. Raad, and W. Susilo, "Programmable logic controllers based systems (PLC-BS): Vulnerabilities and threats," *SN Applied Sciences*, vol. 1, pp. 1-12, 2019.
- [18] L. G. D. O. Vêras, F. L. L. Medeiros and L. N. F. Guimarães, "Systematic Literature Review of Sampling Process in Rapidly-Exploring Random Trees," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50933-50953, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908100.
- [19] J. Doornbos, K. E. Bennin, Ö. Babur and J. Valente, "Drone Technologies: A Tertiary Systematic Literature Review on a Decade of Improvements," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 23220-23239, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3364676.
- [20] M. Phillips, J. B. Reed, D. Zwicky, A. S. van Epps, A. G. Buhler, E. M. Rowley, Q. Zhang, J. M. Cox, and W. Zakharov, "Systematic Reviews in the Engineering Literature: A Scoping Review," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 62648-62663, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3394755.
- [21] B. N. Shaheed and N. H. Selman, "Design and implementation of a control system for a steel plate cutting production line using programmable logic controller," *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, vol. 13, no. 4, 2023.
- [22] S. Ardi, M. A. R. Nurdin, and A. Ponco, "Design of pokayoke system on the process of mounting actuator bracket based on programmable logic controller in automotive manufacturing industry," in *MATEC Web of Conferences*, vol. 197, p. 14014, 2018, EDP Sciences, doi: 10.1051/mateconf/201819714014.
- [23] Q. Li and S. J. Hsieh, "An intelligent tutoring system for computer numerical control programming," *Int. J. Eng. Educ.*, vol. 35, pp. 252-261, 2018.
- [24] A. Adam and Y. Yusof, "Review On Advanced Numerical Control In Manufacturing System," 2019 4th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT), Guilin, China, 2019, pp. 247-250, doi: 10.1109/ICECTT.2019.00063.
- [25] A. Moallim, J. -M. Lee and D. -S. Kim, "Wireless control and monitoring using Programmable Logic Controller (PLC)," 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, Korea (South), 2017, pp. 1763-1767, doi: 10.23919/ICCAS.2017.8204259.
- [26] F. Fathahillah, M. Siswanto, M. Fauziyah, R. Parlindungan, R. I. Putri, and Y. Roh, "Implementation of Programmable Logic Controller in multi machine operations with product sorting and packaging based on colour detection," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 732, no. 1, p. 012069, Jan. 2020, doi: 10.1088/1757-899x/732/1/012069.
- [27] A. C. H. Cheong, K. F. Jie, J. I. Y. Y. Xian, Z. Ibrahim, and S. Ramesh, "Digital twin in manufacturing by using programmable logic controller (PLC)," *AIP Conference Proceedings*, Jan. 2023, doi: 10.1063/5.0113851.
- [28] M. Kaban, D. Tamir and P. Singh, "Electrical load controller for rural micro-hydroelectric systems using a programmable logic controller," 2015 IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference (IHTC2015), Ottawa, ON, Canada, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/IHTC.2015.7238042.
- [29] A. A. Ka'bi, "Management of Electrical Lighting System Using Programmable Logic Controllers," 2021 2nd International Conference on Smart Computing and Electronic Enterprise (ICSCEE), Cameron Highlands, Malaysia, 2021, pp. 121-126, doi: 10.1109/ICSCEE50312.2021.9498023.
- [30] R. Jidin and A. B. Othman, "A computed River Flow-Based turbine controller on a programmable logic controller for Run-Off river hydroelectric systems," *Energies*, vol. 10, no. 11, p. 1717, Oct. 2017, doi: 10.3390/en1011717.
- [31] J. Barrera and C. Durán, "Development of a three-bladed horizontal axis wind turbine with active control by using a programmable logic controller," *Journal of Physics. Conference Series*, vol. 1704, no. 1, p. 012012, Nov. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1704/1/012012.

- [32] S. Roy, M. Mandal, C. Jena, P. Sinha and T. Jena, "Programmable-Logic-Controller Based Robust Automatic Cleaning of Solar Panel for Efficiency Improvement," 2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology (APSIT), Bhubaneswar, India, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/APSIT52773.2021.9641148.
- [33] N. Hairul, F. Arifin, R. Wilza, Z. Zakaria, N. Kurniawan, and Y. D. Herlambang, "Automation of load electricity operating system using PLC (Programmable Logic Controller)," International Journal of Research in Vocational Studies, vol. 3, no. 1, pp. 76–81, May 2023, doi: 10.53893/ijrvoc.v3i1.200.
- [34] P. Pal, A. K. Parvathy, K. R. Devabalaji, S. J. Antony, S. Ocheme, T. S. Babu, H. H. Alhelou, and T. Yuvaraj, "IoT-Based Real Time Energy Management of Virtual Power Plant Using PLC for Transactive Energy Framework," in IEEE Access, vol. 9, pp. 97643-97660, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3093111.
- [35] A. Al-Nakeeb, A. A. Al-Samawi, and H. A. Al-Saffar, "Upgrading of alum preparation and dosing unit for Sharq Dijla Water Treatment Plant by using programmable Logic Controller system," Mağalla Al-handasa/Journal of Engineering, vol. 24, no. 2, pp. 131–141, Feb. 2018, doi: 10.31026/j.eng.2018.02.09.
- [36] B. Puviyarasi, K. Srividya, S. Madhuprabha, S. Thomas, E. R. Devi, and K. Sindhusa, "Inline electrolytic disinfected water supply system using programmable logic controller," 2021 4th International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT), Dec. 2021, doi: 10.1109/iccct53315.2021.9711905.
- [37] Y. M. K. Ali, O. A. Zargelin, F. Lashhab, and A. Alaribi, "Water Level Control System using Programmable Logic Controller (PLC): Rujban Water Supply System," 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), Apr. 2021, doi: 10.1109/iemtronics52119.2021.9422619.
- [38] G. Kavitha and R. Varatharajan, "Improved Fuzzy rule set distributed algorithm based smart water management system using programmable logic controller," Neural, Parallel & Scientific Computations, vol. 28, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.46719/npsc20202832.
- [39] S. Ning and S. Hong, "Programmable logic controller-based automatic control for municipal wastewater treatment plant optimization," Water Practice and Technology, vol. 17, no. 1, pp. 378–384, Dec. 2021, doi: 10.2166/wpt.2021.121.
- [40] M. Faisal, K. M. Muttaqi, D. Sutanto, A. Q. Al-Shetwi, P. J. Ker, and M. A. Hannan, "Control technologies of wastewater treatment plants: The state-of-the-art, current challenges, and future directions," Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 181, p. 113324, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113324.
- [41] M. Kornaszewski, "Microprocessor technology and programmable logic controllers in new generation railway traffic control and management systems," Archives of Transport System Telematics, vol. 11, no. 2, pp. 18-23, 2018.
- [42] M. Kornaszewski, "The use of programmable logic controllers in railway signaling systems," in Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure, 2020, pp. 104–111. doi: 10.1007/978-3-030-39688-6_15.
- [43] B. Akmansayar, S. Kurtulan and S. B. Örs, "Design of core blocks and implementation on a programmable logic controller for a train signalization system," 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, Turkey, 2015, pp. 1942-1945, doi: 10.1109/SIU.2015.7130242.
- [44] I. Tomar, I. Sreedevi, and N. Pandey, "PLC and SCADA based Real Time Monitoring and Train Control System for the Metro Railways Infrastructure," Wireless Personal Communications, vol. 129, no. 1, pp. 521–548, Oct. 2022, doi: 10.1007/s11277-022-10109-1.
- [45] M. A. Koondhar, M. A. Koondhar, and A. A. Malak, "Laboratory based Automatic Traffic Light Control System by using (PLC) Programmable Logic Controller," Journal of Applied and Emerging Sciences, vol. 10, no. 1, p. 41, Jun. 2020, doi: 10.36785/jaes.101352.
- [46] S. Amir, M. S. Kamal, S. S. Khan and K. M. A. Salam, "PLC based traffic control system with emergency vehicle detection and management," 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), Kerala, India, 2017, pp. 1467-1472, doi: 10.1109/ICICT1.2017.8342786.
- [47] B. Ahmed, Q. Shehzad, I. Ullah, N. Zahoor, and H. M. Tayyab, "An Effective Combination of PLC and Microcontrollers for Centralized Traffic Control and Monitoring System," Engineering Proceedings, vol. 12, no. 1, p. 71.
- [48] J. W. Lee, and B. R. Lee, "Design of Automatic Guided Vehicle Controller with Built-in Programmable Logic Controller," Journal of the Institute of Convergence Signal Processing, vol. 20, no. 3, pp. 118-124, 2019.
- [49] V. H. Kempegowda, N. Raghukiran, and K. J. Reddy, "Productivity enhancement by using programmable logic controller-based automated guided vehicles for material handling," International Journal of Mechatronics and Automation, vol. 7, no. 4, p. 175, Jan. 2020, doi: 10.1504/ijma.2020.110855.
- [50] M. Ayad, O. Alkaragole, D. Comito, and K. Ayad, "Implementation of a smart house using a Programmable Logical Controller (PLC)," in Lecture notes in networks and systems, 2023, pp. 109–124. doi: 10.1007/978-3-031-37963-5_9.
- [51] Z. Ding, Z. Zhang, and V. Luu, "Designing of Programmable Logic Controller for Intelligent Power Saving System," International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, vol. i, no. 8, Nov. 2020, doi: 10.17683/ijomam/issue8.47.
- [52] S. Kim and M. Kim, "A Case Study on the Implementation of a River Water Level Monitoring System using PLC(Programmable Logic Controller) and Public Telecommunication Network," Han-guk Jeonja Georae Hakoeji, vol. 20, no. 4, pp. 1–17, Nov. 2015, doi: 10.7838/jsebs.2015.20.4.001.
- [53] A. Suresh, R. Udendhran, and M. Balamurugan, "Internet of things based solutions and applications for urban planning and smart city transportation," in EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, 2020, pp. 43–62. doi: 10.1007/978-3-030-34328-6_3.
- [54] M. S. Steffi, P. Visitha, & C. Kamal, "Automatic irrigation system using programmable logic controller," International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, vol. 1, no. 1, pp. 246-252, 2015.
- [55] C. Gencoglan, S. Gencoglan, Y. Nikpeyma, & A. B. Ucak, "Determination of water-yield relationship of comice pear (Pyrus Communis L.) variety irrigated by the irrigation automation system (IAS) based on programmable logic controller (PLC)," Fresenius Environmental Bulletin, vol. 28, no. 4, pp. 2433-2441, 2019.
- [56] N. Thong-Un and W. Wongsaroj, "Productivity enhancement using low-cost smart wireless programmable logic controllers: A case study of an oyster mushroom farm," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 195, p. 106798, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.106798.
- [57] M. M. Rashid, A. Sall, & T. F. Hasan, "Automated Farming System Using Distributed Controller: A Feasibility Study," Asian Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 21-29, 2021.
- [58] V. Sahu, "Automation of Gates of Water Reservoir Using Programmable Logic Controller (PLC)," International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, vol. 6, no. 4, pp. 3924–3927, Apr. 2018, doi: 10.22214/ijraset.2018.4644.
- [59] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, dan M. Palaniswami, M. "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," Future generation computer systems, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, 2013.
- [60] I. Lee and K. Lee, "The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises," Business Horizons, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.bushor.2015.03.008.
- [61] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," Manufacturing Letters, vol. 3, pp. 18–23, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [62] I. Stojmenovic and S. Wen, "The Fog Computing Paradigm: Scenarios and security issues," Annals of Computer Science and Information Systems, Sep. 2014, doi: 10.15439/2014f503.

- [63] J. Wan, "Advances in Cyber-Physical Systems research," *Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 5, no. 11, Jan. 2011, doi: 10.3837/tiis.2011.11.001.
- [64] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of things for smart cities," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, Feb. 2014, doi: 10.1109/jiot.2014.2306328.
- [65] L. Da Xu, W. He, and S. Li, "Internet of Things in Industries: A survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014, doi: 10.1109/tii.2014.2300753.
- [66] N. M. Wu, N. T.-J. Lu, N. F.-Y. Ling, N. J. Sun, and N. H.-Y. Du, "Research on the architecture of Internet of Things," 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), Aug. 2010, doi: 10.1109/icacte.2010.5579493.
- [67] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge computing: vision and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, Oct. 2016, doi: 10.1109/jiot.2016.2579198.
- [68] S. Sicari, A. Rizzardi, L. A. Grieco, and A. Coen-Porisini, "Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead," *Computer Networks*, vol. 76, pp. 146–164, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.comnet.2014.11.008.
- [69] T. Alves, R. Das and T. Morris, "Embedding Encryption and Machine Learning Intrusion Prevention Systems on Programmable Logic Controllers," in *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 99–102, Sept. 2018, doi: 10.1109/LES.2018.2823906.
- [70] V. M. Vaidyan and A. Tyagi, "Towards Quantum Artificial Intelligence Electromagnetic Prediction Models for Ladder Logic Bombs and Faults in Programmable Logic Controllers," 2022 International Conference on Electronic Systems and Intelligent Computing (ICESIC), Chennai, India, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICESIC53714.2022.9783543.
- [71] Y. I. Eremenko, A. I. Glushchenko and A. V. Fomin, "On PI-Controller neural tuner implementation in programmable logic controller to improve rejection of disturbances effecting heating plant," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076137.
- [72] J. Silva, D. Marques, R. Aquino, and O. Nóbrega, "A PLC-based Fuzzy Logic Control with Metaheuristic Tuning," *Studies in Informatics and Control*, vol. 28, no. 3, pp. 265–278, Oct. 2019, doi: 10.24846/v28i3y201903.
- [73] B. Hu and J. Wang, "Detection of PCB Surface Defects With Improved Faster-RCNN and Feature Pyramid Network," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108335–108345, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3001349.
- [74] P. Krupa, D. Limon, and T. Alamo, "Implementation of model predictive control in programmable logic controllers," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 1117–1130, May 2021, doi: 10.1109/tcst.2020.2992959.
- [75] D. Bhamare, M. Zolanvari, A. Erbad, R. Jain, K. Khan, and N. Meskin, "Cybersecurity for industrial control systems: A survey," *Computers & Security*, vol. 89, p. 101677, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.cose.2019.101677.
- [76] S. McLaughlin et al., "The cybersecurity landscape in industrial control systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1039–1057, May 2016, doi: 10.1109/jproc.2015.2512235.
- [77] W. Knowles, D. Prince, D. Hutchison, J. F. P. Disso, and K. Jones, "A survey of cyber security management in industrial control systems," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 9, pp. 52–80, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.ijcip.2015.02.002.
- [78] J. Graham, J. Hieb, and J. Naber, "Improving cybersecurity for Industrial Control Systems," In 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (Isie), Jun. 2016, doi: 10.1109/isie.2016.7744960.
- [79] F. Khorrami, P. Krishnamurthy and R. Karri, "Cybersecurity for Control Systems: A Process-Aware Perspective," in *IEEE Design & Test*, vol. 33, no. 5, pp. 75–83, Oct. 2016, doi: 10.1109/MDAT.2016.2594178.
- [80] X. Mao, X. Li, Y. Huang, J. Shi and Y. Zhang, "Programmable Logic Controllers Past Linear Temporal Logic for Monitoring Applications in Industrial Control Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 7, pp. 4393–4405, July 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3123194.
- [81] A. A. Ka'bi, "Energy Consumption Management Using Programmable Logic Controllers (PLC's)," 2021 IEEE Technology & Engineering Management Conference - Europe (TEMSCON-EUR), Dubrovnik, Croatia, 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/TEMSCON-EUR52034.2021.9488607.
- [82] A. Saxena, K. A. Jabbar and L. H. A. Fezaa, "Enhancing Industrial Automation: A Comprehensive Study on Programmable Logic Controllers (PLCs) and their Impact on Manufacturing Efficiency," 2023 3rd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS), Tashkent, Uzbekistan, 2023, pp. 1182–1187, doi: 10.1109/ICTACS59847.2023.10390129.
- [83] D. Vasile-Alexandru, G. Eugen, C. Laura and L. Linawati, "Versatile Control of an Automotive Assembly Line by using Programmable Logic Controllers," 2023 17th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania, 2023, pp. 1–4, doi: 10.1109/EMES58375.2023.10171789.
- [84] J. Son, S. Noh, J. Choi, and H. Yoon, "A practical challenge-response authentication mechanism for a Programmable Logic Controller control system with one-time password in nuclear power plants," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 51, no. 7, pp. 1791–1798, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.net.2019.05.012.
- [85] H. Wu, Y. Geng, K. Liu, and W. Liu, "Research on Programmable Logic Controller Security," *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, vol. 569, no. 4, p. 042031, Jul. 2019, doi: 10.1088/1757-899x/569/4/042031.
- [86] H. Eassa, I. Adly and H. H. Issa, "RISC-V based implementation of Programmable Logic Controller on FPGA for Industry 4.0," 2019 31st International Conference on Microelectronics (ICM), Cairo, Egypt, 2019, pp. 98–102, doi: 10.1109/ICM48031.2019.9021939.