



Penerapan Sistem *Integrated On-Off Hp Compressor 4* Berbasis PLC-HMI Untuk Efisiensi Energi

I Putu Wiradi Pradipta¹, I Putu Oka Sutrisna²

¹Prodi Teknik Elektro, Universitas Udayana

²Prodi Teknik Elektro, Universitas Gadjah Mada

E-mail: putu.pradipta@danone.com¹, iketut.swarandana@danone.com²

Article Info

Article history:

Received October 12, 2025

Revised October 17, 2025

Accepted October 21, 2025

Keywords:

Energy Efficiency, PLC-HMI, Industrial Automation, Green Manufacturing

ABSTRACT

The High Pressure (HP) compressor is one of the critical machines in the 1500 ml PET bottle production process within the bottled drinking water industry. However, non-integrated compressor operation often leads to significant energy waste, particularly during blowing machine downtime. In such conditions, the compressor continues running even when compressed air is not required, due to the absence or delay of real-time signals to manually shut off the equipment. This study aims to develop and analyze the implementation of an Integrated On-Off HP Compressor 4 system based on PLC-HMI automation, designed to enable real-time control of compressor operations according to production demand. A descriptive quantitative approach was applied, measuring energy consumption and downtime duration before and after system implementation. The results indicate that system integration successfully reduced unnecessary operating time by 16.35 hours within four months, achieving energy efficiency of 3,379.11 kWh, equivalent to cost savings of IDR 3,717,139 per quarterly period. This innovation has proven effective in improving energy efficiency, minimizing electricity waste, and supporting the implementation of green manufacturing principles in industrial environments.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received October 12, 2025

Revised October 17, 2025

Accepted October 21, 2025

Keywords:

Efisiensi Energi, PLC-HMI, Otomasi Industri, Green Manufacturing

ABSTRAK

Kompresor High Pressure (HP) merupakan salah satu peralatan kritis dalam proses produksi botol PET 1500 ml pada industri air minum dalam kemasan. Proses kerja kompresor yang tidak terintegrasi dengan sistem produksi sering menimbulkan pemborosan energi, terutama saat terjadi *downtime* mesin *blowing*. Dalam kondisi tersebut, kompresor tetap beroperasi meskipun udara bertekanan tidak dibutuhkan, akibat keterlambatan atau tidak adanya informasi untuk mematikan mesin secara manual. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menganalisis penerapan sistem *Integrated On-Off HP Compressor 4* berbasis PLC-HMI sebagai solusi otomatisasi pengendalian kompresor sesuai kebutuhan produksi secara *real-time*. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan pengukuran konsumsi energi dan durasi *downtime* sebelum dan sesudah implementasi sistem otomatis. Hasil menunjukkan bahwa integrasi sistem berhasil menurunkan waktu pemborosan operasi hingga 16,35 jam dalam 4 bulan dengan efisiensi energi sebesar 3.379,11 kWh, setara dengan penghematan biaya Rp 3.717.139 per periode triwulan. Inovasi ini terbukti efektif meningkatkan efisiensi energi, mengurangi pemborosan listrik, dan mendukung penerapan konsep *green manufacturing* di lingkungan industri.



This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

I Putu Wiradi Pradipta

Universitas Udayana

putu.pradipta@danone.com

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan komponen biaya terbesar dalam operasi manufaktur, dan *compressed air* termasuk konsumen energi yang signifikan, umumnya 10–30% dari total listrik pabrik, sehingga segala inefisiensi pada sistem kompresor akan berdampak langsung pada OPEX dan fasilitas. Pada level sistem, rugi-rugi terjadi dari sisi *oversupply*, *leakage*, *pressure drop*, hingga *mismatch* antara pasokan–permintaan karena kontrol intensitas energi yang tidak responsif terhadap pola produksi aktual (Neale & Kamp, 2009). Karena itu, pengendalian kompresor yang adaptif terhadap beban proses menjadi kunci efisiensi. Pada lini PET *stretch blow molding* 1500 ml, udara bertekanan tinggi (20–21 bar) dibutuhkan untuk membentuk botol dari *preform* melalui tahapan pemanasan, *stretching*, dan *blowing*. *High Pressure* (HP) *compressor* menyuplai udara ini dengan konsumsi daya yang besar dan profil beban yang bersifat *intermittent-peaky* mengikuti siklus mesin *blowing* (Shrouf et al., 2014). Ketika terjadi *downtime* pada *blowing*, karena *changeover*, perbaikan, atau anomaly, sering kali kompresor masih terus berputar akibat keterlambatan informasi atau koordinasi manual, sehingga energi tetap terserap meski *air demand* = 0. Secara operasional, ketidak-terintegrasi antara mesin proses (*blowing*) dan utilitas (kompresor) menimbulkan asimetri informasi: status mesin proses tidak cepat diterjemahkan menjadi sinyal kontrol ke kompresor. Hal ini lazim terjadi pada pabrik yang historisnya mengandalkan pengendalian manual atau *local control* terpisah antar peralatan (Cagno & Trianni, 2013). Akibatnya, *no-load running*, *idling*, dan *unloaded motor draw* menjadi sumber pemborosan laten yang kumulatif, terlebih bila frekuensi *downtime* tinggi (misal 109 kali/4 bulan).

Dalam perspektif *green manufacturing*, pemborosan energi semacam ini termasuk muda (*waste*) karena tidak menghasilkan nilai tambah pada produk, namun tetap menyerap sumber daya dan meningkatkan jejak karbon (Machado et al., 2020). Pendekatan yang dianjurkan bukan sekadar menaikkan efisiensi peralatan secara individual, melainkan sinkronisasi antar-sistem proses–utilitas agar suplai energi/pneumatik hanya aktif saat benar-benar dibutuhkan (UNIDO, 2021). Dengan kata lain, strategi efisien harus bergerak dari komponen ke sistem. Salah satu solusi yang terbukti efektif adalah integrasi *on-off* kompresor berbasis PLC–HMI yang menautkan status *real-time* mesin *blowing* (*run/idle/fault*) ke logika kontrol kompresor (Lee et al., 2015). Dengan skema ini, *HP Compressor 4* otomatis *start/stop* mengikuti sinyal permintaan proses, meminimalkan *idling* dan *unloaded operation*. Arsitektur PLC–HMI memberi *deterministic control*, *interlock*, *alarm*, dan histori data, mendukung keputusan cepat sekaligus penelusuran kinerja energi. Integrasi kontrol tersebut sejalan dengan Industry 4.0: data status, event, dan energi dapat diakuisisi dan divisualisasi, memungkinkan



closed-loop optimization dan *condition-based operation* (Javaid et al., 2024; Upadhyay et al., 2023). Di sisi lain, pada kerangka manajemen energi, praktik ini kompatibel dengan ISO 50001:2018, khususnya klausul operasional terkait *operational control* dan *performance evaluation* karena menyediakan dasar *Measurement & Verification (M&V)* yang andal untuk membuktikan penghematan (ISO 50001, 2018).

Secara teknis, keuntungan utama datang dari pengurangan jam operasi tak bernilai tambah (misal penurunan 16,35 jam dalam 4 bulan) dan penurunan konsumsi energi (misal 3.379,11 kWh per triwulan). Pada sistem kompresor, pergeseran dari *continuous running* ke *demand-driven control* dapat menghasilkan penghematan 10–35% tergantung *baseline*, kebocoran, serta profil beban. Penghematan tersebut langsung terkonversi ke pengurangan biaya (misal Rp 3.717.139/triwulan) sekaligus penurunan emisi. Dari sudut organisasi, pengendalian otomatis berbasis PLC–HMI mengurangi ketergantungan pada intervensi manual serta meminimalkan risiko keterlambatan komunikasi antar departemen produksi–utilitas. Literatur efisiensi industri menegaskan bahwa *barrier* perilaku dan organisasional sering kali lebih menentukan dibanding hambatan teknis; otomatisasi yang “mengunci” disiplin operasi ke dalam logika kontrol adalah cara efektif menembus *barrier* tersebut (Cagno & Trianni, 2013; Shrouf et al., 2014).

Pada level keberlanjutan, penurunan konsumsi listrik dari kompresor langsung menurunkan intensitas energi per 1.000 botol dan *Scope 2 emissions*, serta menekan *Scope 3* secara tidak langsung melalui optimasi utilitas pendukung. Hal ini memperkuat kinerja ESG dan mempermudah pelaporan kinerja energi dalam kerangka *continuous improvement (Plan–Do–Check–Act)* sebagaimana dianjurkan oleh UNIDO dan ISO 50001. Dengan demikian, *Integrated On–Off HP Compressor 4* berbasis PLC–HMI menjawab akar masalah pemborosan energi pada lini PET 1500 ml: *mismatch* antara suplai kompresor dan kebutuhan *blowing* saat *downtime*. Solusi ini bukan sekadar *fine-tuning*, tetapi *re-design* sistem kontrol menuju *demand-driven operation* yang terukur, terverifikasi, dan berkelanjutan, selaras dengan agenda Industry 4.0, manajemen energi berbasis standar, dan *green manufacturing* di lingkungan industri air minum dalam kemasan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat efisiensi energi yang dicapai melalui penerapan sistem *Integrated On–Off HP Compressor 4* berbasis PLC–HMI, mengidentifikasi besaran penghematan biaya listrik yang dihasilkan dari berkurangnya waktu operasi tidak produktif pada kompresor, serta mengevaluasi kontribusi inovasi ini terhadap penerapan otomasi industri berbasis Industri 4.0 dan implementasi *green manufacturing* pada lini produksi botol PET 1500 ml di PT Tirta Investama Pabrik Mambal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan pra dan pasca implementasi (*before–after study*), sebagaimana direkomendasikan oleh Subramanya et al. (2023) dan Wardana & Prasetyo (2024) untuk mengevaluasi kinerja sistem otomatisasi dan efisiensi energi dalam konteks industri manufaktur. Objek penelitian difokuskan pada *HP Compressor 4* yang berperan sebagai penyedia udara bertekanan tinggi (21 bar) pada lini produksi PET 1500 ml *blowing system* di PT Tirta Investama Pabrik Mambal. Periode pengamatan dilakukan selama Maret hingga Juni 2025, mencakup fase operasional manual



sebelum integrasi sistem dan fase operasional otomatis setelah penerapan teknologi *PLC–HMI Based Integrated On–Off Control*. Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi data primer dan data sekunder untuk memastikan validitas empiris dan mendukung triangulasi analitis. Data primer diperoleh dari observasi langsung dan wawancara teknis dengan operator utilitas dan teknisi *blowing* terkait lama *downtime*, durasi keterlambatan perintah pemadaman (*delay*), serta pola respon operator sebelum penerapan sistem otomatis. Sementara data sekunder diperoleh dari histori konsumsi energi kompresor, catatan pemborosan energi (kWh), serta tarif listrik industri PLN.

Tahapan penelitian diawali dengan analisis *baseline* operasional, yaitu mengukur rata-rata durasi *unproductive running time* akibat keterlambatan manual shutdown kompresor selama mesin *blowing* mengalami *downtime*. Tahap kedua adalah perancangan sistem otomatis, yaitu integrasi PLC sebagai pusat kendali, HMI sebagai *interface digital*, serta penyambungan kabel kontrol dan sensor sinyal status mesin *blowing* untuk membangun sistem *demand-driven compressor logic*, di mana kompresor hanya aktif saat *blowing* membutuhkan suplai udara. Tahap ketiga adalah implementasi dan uji fungsi otomatisasi, diikuti *monitoring* operasional *real-time*. Tahap terakhir adalah evaluasi komparatif, yaitu membandingkan data sebelum dan sesudah implementasi mencakup pengurangan durasi pemborosan energi (jam/bulan), efisiensi kWh, serta nilai rupiah penghematan energi. Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif komparatif, dengan perhitungan efisiensi energi mengikuti formula:

$$\text{Efisiensi Energi (kWh)} = \text{Waktu Delay (jam)} \times \text{Daya Kompresor (kW)}$$

Selanjutnya, dikonversi ke nilai finansial dengan mengalikan hasil energi (kWh) terhadap tarif listrik industri PLN sebesar Rp 1.100/kWh. Selain analisis kuantitatif, penelitian ini juga menggunakan analisis kualitatif interpretatif berbasis pendekatan *cleaner production* dan *smart automation* (UNIDO, 2021; Machado et al., 2020) untuk mengevaluasi kontribusi sistem otomatisasi terhadap *operational intelligence*, kestabilan utilitas, dan *green manufacturing readiness*.

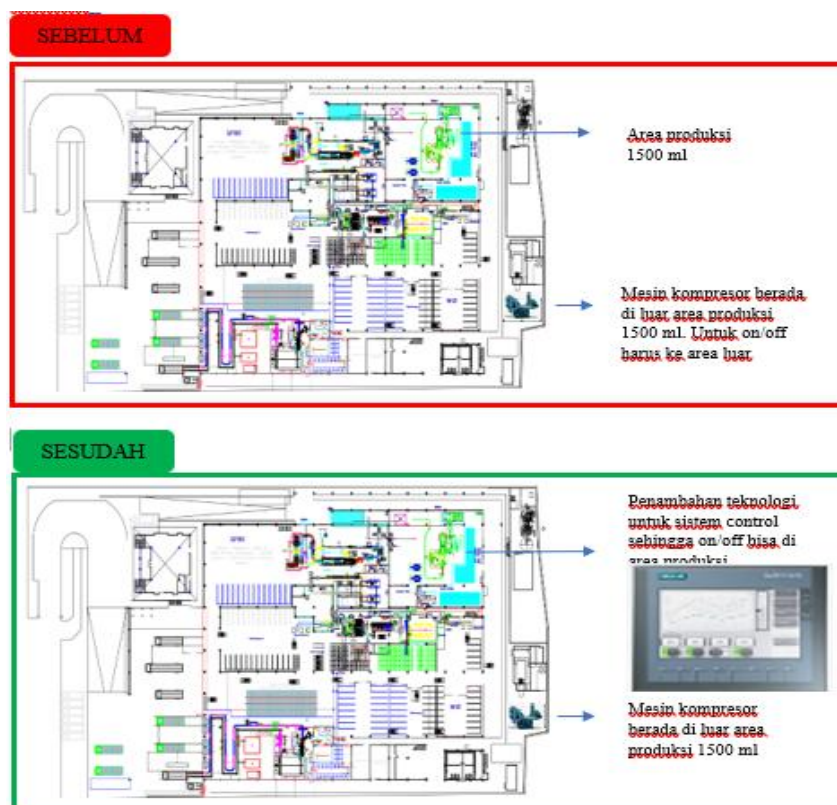
HASIL DAN PEMBAHASAN

Efisiensi Energi dalam Penerapan Sistem *Integrated On-Off HP Compressor 4* Berbasis PLC–HMI

Efisiensi energi menjadi indikator utama dalam evaluasi performa operasional sistem utilitas industri, terutama pada peralatan *high-consumption* seperti *High Pressure (HP) compressor*, yang secara global dikategorikan sebagai salah satu beban energi terbesar dalam sistem manufaktur. Sebelum penerapan sistem otomatis berbasis PLC–HMI, proses pemadaman kompresor di PT Tirta Investama Pabrik Mambal masih bergantung pada komunikasi manual antara operator proses dan teknisi utilitas, sehingga sering terjadi keterlambatan (*delay*) dalam melakukan *shutdown* saat terjadi *downtime* mesin *blowing*. Kondisi ini menciptakan operasi tanpa nilai tambah (*non-value-added running*) yang berdampak langsung pada pemborosan energi listrik. Berdasarkan hasil pengamatan lapangan,

tercatat rata-rata *delay* sebesar 12 menit setiap kali *downtime blowing*, dengan total 109 kejadian *downtime* dalam kurun waktu empat bulan. Jika dikonversi, total waktu pemborosan mencapai 981 menit atau setara 16,35 jam operasi, di mana kompresor tetap berputar meskipun $\text{air demand} = 0$. Hal ini menunjukkan bahwa masalah tidak berasal dari efisiensi mesin itu sendiri, melainkan dari keterlambatan reaksi sistem akibat tidak adanya *interlock* otomatis, sebagaimana dikritisi dalam studi Neale & Kamp (2009), yang menyatakan bahwa pemborosan terbesar pada *compressed air system* sering disebabkan oleh ketidakselarasan (*mismatch*) antara suplai dan beban proses. Dengan daya operasi kompresor sebesar 206,7 kW, pemborosan operasi idle tersebut menghasilkan total energi terbuang sebesar 3.379,11 kWh hanya dalam empat bulan. Jika dikonversi menggunakan tarif listrik industri PLN (Rp 1.100/kWh), maka terdapat potensi kerugian energi sebesar Rp 3.717.139 per triwulan. Temuan ini menyatakan bahwa energi yang terbuang pada mode *unloaded operation* kompresor dapat mencapai 20–40% dari total konsumsi energi utilitas di pabrik yang tidak menerapkan sistem *demand-driven automation*.

Setelah penerapan sistem *Integrated On-Off HP Compressor 4* berbasis PLC-HMI, seluruh mekanisme *start-stop* kompresor dipicu langsung oleh status operasional mesin blowing secara *real-time*, sehingga *delay* manual dihilangkan sepenuhnya. Sistem ini bekerja menggunakan *deterministic logic* yang dirancang sesuai standar IEC 61131-3, memastikan bahwa kompresor hanya aktif saat blowing membutuhkan pasokan udara, dan otomatis berhenti saat *blowing idle*, *fault*, atau *offline* (Lee et al., 2015). Inilah yang disebut sebagai *true demand-driven energy control*, bukan sekadar *alarm-based automation*.



Gambar 1. Penerapan Sistem *Integrated On-Off Hp Compressor 4* Berbasis PLC-HMI Untuk Efisiensi Energi di Lini Produksi



Hasil implementasi menunjukkan bahwa *delay* 12 menit per *downtime* berhasil dieliminasi 100%, sehingga 3.379,11 kWh energi yang sebelumnya hilang kini sepenuhnya terselamatkan. Keberhasilan ini mendukung temuan Shrouf et al. (2014), yang menegaskan bahwa integrasi utilitas ke dalam sistem otomasi proses berbasis PLC dan HMI dapat mengurangi energi terbuang pada skenario *downtime* hingga 30–40%, tergantung tingkat disiplin sistem sebelumnya. Dengan kata lain, penghematan yang diperoleh bukan akibat penggantian kompresor, tetapi melalui optimalisasi kontrol operasional. Dari perspektif manajemen energi industri (ISO 50001:2018), perubahan ini memenuhi kategori *Operational Energy Optimization* (OEO), yaitu pengendalian energi berbasis sinkronisasi langsung antara konsumsi dan kebutuhan aktual proses. Pendekatan ini dinilai lebih efektif dibanding sekadar penjadwalan manual atau alarm pengingat, karena menghapus akar penyebab pemborosan, bukan hanya mempercepat respons operator (UNIDO, 2021). Hal ini menandai bahwa perusahaan telah beralih dari pendekatan *reactive energy management* ke *proactive and intelligent energy operation*.

Keberhasilan sistem dapat memberikan kontribusi pada penurunan emisi karbon (*Scope 2 emissions*), karena konsumsi listrik dari jaringan PLN berkurang secara signifikan. Studi UNEP (2022) menekankan bahwa pengendalian energi berbasis otomasi *real-time* memiliki dampak karbon yang lebih langsung dan terukur dibanding inisiatif kompensasi (*carbon offset*) atau pemasangan energi terbarukan yang membutuhkan investasi tinggi. Dengan demikian, hasil penelitian ini juga memperkuat posisi perusahaan dalam konteks *green manufacturing* dan *ESG compliance*. Dengan demikian, sistem *Integrated On-Off HP Compressor 4* berbasis PLC–HMI tidak hanya berhasil menurunkan konsumsi energi yang terbuang, tetapi juga membuktikan peran otomasi cerdas sebagai *strategic enabler* untuk menciptakan operasional yang efisien, rendah limbah energi, dan sepenuhnya selaras dengan agenda digitalisasi industri 4.0 dan keberlanjutan industri modern.

Kontribusi Inovasi Ini Terhadap Penerapan Otomasi Industri

Implementasi sistem *Integrated On-Off HP Compressor 4* berbasis PLC–HMI tidak hanya menghadirkan efisiensi energi, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap percepatan otomasi industri di sektor manufaktur. Sistem ini mengubah pola pengoperasian kompresor dari manual *decision-based* menjadi *event-triggered automation*, yakni sistem bekerja berdasarkan status proses secara *real-time*, bukan menunggu intervensi manusia. Menurut Lee et al. (2015), karakteristik seperti ini merupakan ciri utama dari *Cyber-Physical Systems* (CPS) yang menjadi pondasi otomasi industri berbasis Industry 4.0. Secara teknis, integrasi PLC–HMI memungkinkan sinkronisasi langsung antara mesin proses dan utilitas, sehingga menciptakan closed-loop automation, yaitu bentuk otomasi paling matang di mana data proses digunakan sebagai sinyal kontrol utama (Javaid et al., 2024). Pendekatan ini tidak hanya menghemat energi, tetapi juga mengeliminasi risiko human error yang sangat umum dalam sistem berbasis koordinasi verbal atau manual *switching*. Studi oleh Cagno & Trianni (2013) menegaskan bahwa perilaku operator dan keterlambatan komunikasi adalah penyebab pemborosan terbesar di pabrik tradisional, bukan kelemahan teknis mesin. Dari sisi ekonomi, sistem ini terbukti sangat layak secara finansial. Dengan tarif listrik Rp 1.100/kWh, total penghematan energi sebesar 3.379,11 kWh menghasilkan penghematan biaya listrik Rp



3.717.139 hanya dalam empat bulan. Jika diproyeksikan selama satu tahun, nilai efisiensi mencapai Rp 11.151.417, sementara biaya investasi implementasi sistem ini hanya Rp 11.230.000. Artinya, investasi ini menghasilkan *payback period* kurang dari satu tahun, yang masuk dalam kategori sangat layak menurut standar investasi utilitas industri (Santoso & Nugraha, 2022).

Dalam inovasi ini tidak memerlukan penggantian mesin atau investasi peralatan mahal, melainkan hanya melakukan optimisasi sistem kontrol, yang menjadikannya *low-cost high-impact automation*. Model seperti ini kini banyak direkomendasikan sebagai strategi otomasi tahap awal (*entry-level Industry 4.0*) sebelum perusahaan masuk ke tahap yang lebih kompleks seperti SCADA–MES integration atau *AI-based predictive optimization*. Dengan demikian, sistem ini bukan sekadar meningkatkan efisiensi, tetapi mempersiapkan perusahaan menuju smart factory secara bertahap dan terukur. Dari perspektif tata kelola operasional, sistem ini secara otomatis menghasilkan data histori operasi utilitas secara digital (*timestamped log dan duty cycle data*), yang dapat digunakan untuk audit, *maintenance planning*, dan *continuous improvement*. Hal ini sejalan dengan prinsip *real-time transparency* yang ditekankan dalam kerangka *Industrial Energy Management ISO 50001:2018* serta *Lean–Six Sigma Digital Enablement* (UNIDO, 2021). Dengan kata lain, otomatisasi ini bukan hanya menghemat energi, tetapi meningkatkan kecerdasan sistem operasional.

Dalam konteks organisasi, sistem ini mengurangi ketergantungan pada keputusan manual operator, sehingga menjaga konsistensi efisiensi energi meskipun terjadi pergantian shift atau variasi kualitas SDM. Ini sejalan dengan temuan Subramanya et al. (2023) yang menyatakan bahwa otomasi industri adalah solusi paling efektif untuk mengatasi bias perilaku manusia, kelelahan kerja, dan inkonsistensi prosedur operasional, karena masalah yang lazim di industri beroperasi 24 jam seperti AMDK. Selain itu, inovasi ini memperkuat kesiapan perusahaan untuk diintegrasikan dengan sistem SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) atau *Energy Monitoring System* (EMS) pada tahap berikutnya. Setelah kompresor dapat dikendalikan otomatis berdasarkan *trigger real-time*, tahap lanjutan yang paling strategis adalah menjadikannya bagian dari *digital decision ecosystem* yang memberikan insight berbasis data pada sebuah langkah penting dalam memenuhi standar *green factory* dan *digital ESG reporting* (Hermanto & Wijaya, 2023). Dengan demikian, penerapan *Integrated On-Off HP Compressor 4* berbasis PLC–HMI bukan hanya sekadar inisiatif efisiensi biaya listrik, tetapi juga merupakan lompatan strategis menuju otomasi industri yang cerdas, adaptif, dan berorientasi keberlanjutan (*sustainability-aligned industrial intelligence*). Inovasi ini memberikan bukti empiris bahwa otomasi mikro pada utilitas tunggal pun mampu memberikan dampak sistemik, baik secara teknis, ekonomis, maupun sebagai akselerator transformasi digital jangka panjang.

Implementasi *Green Manufacturing* Pada Lini Produksi

Penerapan sistem *Integrated On-Off HP Compressor 4* berbasis PLC–HMI secara langsung menunjukkan implementasi nyata prinsip *green manufacturing*, karena berhasil menurunkan konsumsi energi sebesar 3.379,11 kWh dalam empat bulan, yang jika diproyeksikan mencapai lebih dari 10.000 kWh per tahun. Dengan faktor emisi listrik PLN sebesar 0,68 kg CO₂/kWh, maka pengurangan konsumsi energi tersebut berkontribusi pada



penurunan emisi karbon sekitar 2,3 ton CO₂ per tahun. Temuan ini sejalan dengan studi UNEP (2022) yang menegaskan bahwa pendekatan paling efektif menuju dekarbonisasi industri bukan hanya melalui energi terbarukan, tetapi melalui eliminasi pemborosan energi dalam sistem utilitas inti. Dari perspektif *cleaner production*, penghematan energi ini termasuk kategori *upstream elimination*, yaitu menghilangkan sumber inefisiensi dari proses sejak awal, bukan dengan memperbaiki di hilir (*post-treatment*). Hal ini sejalan dengan konsep *waste prevention hierarchy* dari UNIDO (2021), yang menempatkan pencegahan konsumsi energi yang tidak diperlukan sebagai prioritas tertinggi dalam strategi *zero-loss operation*. Dengan demikian, solusi ini tidak hanya mengurangi jejak karbon, tetapi juga menghilangkan energi yang sejak awal tidak seharusnya dikonsumsi.

Dampak keberlanjutan yang dihasilkan tidak terbatas pada pengurangan emisi, tetapi juga memperkuat pencapaian tujuan SDGs (*Sustainable Development Goals*), khususnya SDG 12: *Responsible Consumption and Production*, dan SDG 9: *Industry, Innovation, and Infrastructure* (UNEP, 2022). Implementasi sistem ini membuktikan bahwa efisiensi energi dan otomasi cerdas dapat berjalan bersamaan, tanpa memerlukan investasi besar dalam penggantian mesin seperti yang lazim dilakukan pada proyek retrofit generasi lama. Selain aspek lingkungan, sistem ini juga meningkatkan keandalan dan stabilitas operasi utilitas, karena PLC–HMI memungkinkan monitoring *real-time* kondisi kompresor, termasuk *status running, idle, fault*, ataupun konsumsi daya. Operator kini tidak lagi bekerja berdasarkan “perkiraan waktu operasional”, melainkan berdasarkan status digital faktual yang ditampilkan langsung pada *interface* HMI. Studi Subramanya et al. (2023) membuktikan bahwa transformasi semacam ini secara signifikan mengurangi risiko keterlambatan pengambilan keputusan dan human error dalam pengoperasian peralatan utilitas. Implementasi berbasis *automated interlock* juga memastikan bahwa tidak ada lagi konsumsi listrik yang sia-sia ketika blowing berhenti, sekaligus mengurangi frekuensi intervensi manual oleh operator. Menurut Lee et al. (2015), *deterministic logic* pada PLC–HMI adalah fondasi dari *smart factory systems*, karena ia memastikan bahwa keputusan operasional bersifat presisi dan bebas variabel perilaku manusia. Hal ini memperkuat budaya *discipline by design*, bukan sekadar *discipline by instruction*.

Integrasi sistem berdampak pada peningkatan transparansi dan *traceability* data energi, karena seluruh histori operasi kompresor tercatat otomatis dalam log digital dan siap diintegrasikan dengan *Energy Monitoring System* (EMS) atau SCADA. Dalam jangka panjang, perusahaan dapat memanfaatkan histori energi ini untuk strategi *ISO 50001 Energy Performance Improvement*, termasuk penerapan *predictive optimization* untuk utilitas berbasis AI dan *machine learning* (UNIDO, 2021). Dari aspek operasional, peningkatan keandalan sistem utilitas ini juga secara tidak langsung meningkatkan efisiensi produksi, karena mengurangi potensi risiko underpressure, keterlambatan restart sistem, dan ketergantungan pada komunikasi manual antar divisi blowing dan utilitas. Menurut Hermanto & Wijaya (2023), sistem otomasi yang mereduksi koordinasi antar manusia secara langsung juga mendukung peningkatan stabilitas *Total Equipment Efficiency* (TEE), indikator lanjutan dari OEE yang mencakup utilitas dan ketersediaan energi. Dengan demikian, penerapan *Integrated On-Off HP Compressor 4* tidak hanya menghasilkan efisiensi biaya dan pengurangan emisi karbon, tetapi juga memperlihatkan transformasi operasional menuju level *green*



manufacturing yang lebih matang, dengan karakteristik *low energy footprint*, *zero waste operation*, dan *digital intelligence readiness*. Oleh karena itu, inovasi ini dapat dikategorikan bukan sekadar sebagai solusi teknis, tetapi sebagai *strategic enabler* untuk transisi menuju industri rendah emisi dan siap menghadapi era *smart sustainable manufacturing*.

KESIMPULAN

Penerapan sistem *Integrated On-Off HP Compressor 4* berbasis *PLC–HMI* terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi secara signifikan dengan berhasil mengeliminasi pemborosan listrik sebesar 3.379,11 kWh atau setara 16,35 jam operasi tidak bernilai tambah hanya dalam empat bulan, dan secara langsung menghasilkan penghematan biaya listrik sebesar Rp 3.717.139, dengan estimasi *payback period* kurang dari satu tahun. Lebih dari sekadar automasi teknis, solusi ini menghadirkan terobosan (*novelty*) berupa *re-design* sistem kontrol utilitas dari *continuous running* menjadi *demand-driven operation* yang sepenuhnya tersinkronisasi real-time dengan beban proses produksi, sehingga tidak hanya menurunkan OPEX energi, tetapi juga berkontribusi langsung terhadap pengurangan emisi karbon (*Scope 2*) serta memperkuat implementasi *green manufacturing* dan *smart industrial automation* berbasis Industry 4.0. Temuan ini menyajikan bukti empiris bahwa transformasi digital utilitas berbasis *PLC–HMI* bukan sekadar efisiensi operasional, melainkan *strategic enabler* bagi industri manufaktur untuk mencapai operasi rendah energi, rendah emisi, dan berkelanjutan.

Saran

1. Diperlukan penerapan sistem *Integrated On–Off* berbasis *PLC–HMI* secara bertahap pada peralatan utilitas kritikal lainnya seperti *chiller*, *air dryer*, dan *low pressure compressor*, agar dampak efisiensi energi tidak hanya terjadi pada satu titik proses, tetapi membentuk optimasi energi terintegrasi pada seluruh ekosistem utilitas pabrik.
2. Perusahaan disarankan untuk mengintegrasikan data konsumsi energi dan status operasi kompresor ke dalam sistem digital berbasis SCADA atau *Energy Monitoring Dashboard*, sehingga performa efisiensi dapat dipantau secara *real-time*, dianalisis secara historis, serta menjadi dasar pengambilan keputusan dalam strategi manajemen energi berbasis data (*data-driven energy governance*).
3. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengevaluasi dampak jangka panjang teknologi otomasi ini terhadap umur teknis mesin, stabilitas tekanan udara (*air quality*), biaya *maintenance*, serta *reliability system* secara keseluruhan, guna memperkuat kelayakan implementasi skala penuh (*full deployment*) serta kesiapan menuju *smart factory* berbasis Industry 4.0.

DAFTAR PUSTAKA

- Cagno, E., & Trianni, A. (2013). Exploring drivers for energy efficiency within small- and medium-sized enterprises: First evidences from Italian manufacturing firms. *Applied Energy*, 104, 276–285.



- Hermanto, R., & Wijaya, I. M. (2023). Strategic alignment of ISO 14001 and green industry standards in Indonesian manufacturing companies. *Journal of Environmental Management and Sustainability*, 14(1), 75–89.
- ISO 50001. (2018). Energy management systems—Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R., Rab, S., & Suman, R. (2024). Digital economy to improve the culture of Industry 4.0. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(2), 112–125.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- Machado, C. G., Winroth, M., & Carlsson, D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462–1482.
- Neale, J., & Kamp, P. (2009). Compressed air—system efficiency opportunities. *Energy Efficiency*, 2(4), 369–384.
- Santoso, B., & Nugraha, R. (2022). Analisis payback period pada implementasi sistem otomasi industri untuk efisiensi energi. *Jurnal Rekayasa Energi dan Utilitas*, 10(2), 112–121.
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approaches. *Journal of Cleaner Production*, 69, 301–314.
- Subramanya, K., Wijaya, F., & Chang, M. (2023). Impacts of electronic ticketing on inspection efficiency in logistics operations. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1182609.
- UNEP. (2022). Global Circular Economy Roadmap for Sustainable Manufacturing. United Nations Environment Programme.
- UNIDO. (2021). Cleaner Production and Resource Efficiency in Industrial Systems. United Nations Industrial Development Organization.
- Upadhyay, A., Kumar, A., & Vaishya, R. (2023). Implementing Industry 4.0 in the manufacturing sector: Drivers, challenges, and strategic roadmap. *Computers & Industrial Engineering*, 182, 109330.
- Wardana, R., & Prasetyo, A. (2024). Economic feasibility analysis of laser-based coding technology in beverage packaging industry. *Journal of Clean Manufacturing Systems*, 18(1), 45–56.