

Rancang Bangun Mesin Stamping Otomatis Berbasis PLC Mitsubishi FX1N-40MR dengan Sistem Inspeksi Visual dan Monitoring IoT

Mohamad Idrus ^{1)*}, Tatyantoro Andrasto ²⁾, Arief Arfriandi³

Teknik Elektro

Fakultas Teknik

Universitas Negeri Semarang

email: * mhmmdidrus@students.unnes.ac.id¹, tatyantoro@mail.unnes.ac.id²,
afriandi@mail.unnes.ac.id³

Abstrak

Proses stamping logo secara manual pada kemasan kardus menghadapi berbagai kendala, antara lain ketidakkonsistenan posisi cap, tekanan yang tidak merata, rendahnya kecepatan produksi, dan tingginya risiko kesalahan akibat kelelahan operator. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan sistem otomasi berbasis Programmable Logic Controller (PLC) Mitsubishi FX1N-40MR sebagai kontrol utama pada prototipe mesin stamping otomatis, menganalisis akurasi sekuensial program PLC dalam mengeksekusi tahapan proses stamping, serta mengevaluasi tingkat keandalan sistem dalam menjalankan proses secara kontinu. Sistem yang dikembangkan terdiri atas panel kontrol PLC, konveyor, tiga silinder pneumatik, modul relai antarmuka, modul ESP32-S3, serta antarmuka web untuk kendali jarak jauh. Program PLC dirancang menggunakan ladder diagram pada perangkat lunak GX Works2 dengan metode shift register untuk kendali sekuensial, dan mendukung Mode Manual serta Mode Otomatis. Integrasi antara PLC dan ESP32-S3 dilakukan melalui relai elektromagnetik sebagai konverter level tegangan dari 3,3 V menjadi 24 V DC, sehingga sistem dapat menerima perintah master on, start, stop, emergency, dan loop trigger dari web server dan menjalankan mode otomatis yang dipicu oleh sinyal inspeksi visual dari kamera. Hasil pengujian menunjukkan akurasi sekuensial 99,6% dari 210 eksekusi tahapan (30 siklus), ketepatan waktu siklus 98,4%, koefisien variasi waktu siklus 0,31%, dan success rate keandalan 98,0% dari 50 siklus kontinu, seluruhnya melampaui ambang batas 95% yang lazim digunakan sebagai kriteria keberhasilan sistem otomasi industri. Kegagalan yang tercatat murni bersumber dari faktor mekanis dan pneumatik, bukan dari logika program PLC. Penelitian ini menghasilkan solusi otomasi yang sederhana, andal, dan terjangkau, sehingga berpotensi diterapkan oleh industri kecil dan menengah untuk meningkatkan produktivitas dan konsistensi kualitas marking pada kemasan produk.

Kata kunci: Akurasi Sekuensial, Inspeksi Visual, PLC Mitsubishi FX1N-40MR, Sistem Iot, Stamping Otomatis.

Abstract

Manual logo stamping on cardboard packaging faces several challenges, including inconsistent stamp positioning, uneven stamping pressure, low production speed, and a high risk of errors caused by operator fatigue. This study aims to implement an automation system based on a Mitsubishi FX1N-40MR Programmable Logic Controller (PLC) as the main controller of an automatic stamping machine prototype, analyze the sequential accuracy of the

PLC program in executing the stamping process, and evaluate the system's reliability during continuous operation. The developed system consists of a PLC control panel, a conveyor, three pneumatic cylinders, a relay interface module, an ESP32-S3 module, and a web-based interface for remote operation. The PLC program was developed using ladder diagram programming in GX Works2 software with a shift register method for sequential control, supporting both Manual and Automatic operating modes. Integration between the PLC and the ESP32-S3 was achieved through an electromagnetic relay that converts the ESP32-S3's 3.3 V output to a 24 V DC PLC input signal. This configuration enables the system to receive Master ON, Start, Stop, Emergency, and Loop Trigger commands from the web server, while automatic operation is initiated by visual inspection signals from a camera. Experimental results demonstrated a sequential accuracy of 99.6% over 210 sequence executions (30 operating cycles), a cycle-time accuracy of 98.4%, a cycle-time coefficient of variation of 0.31%, and a reliability success rate of 98.0% during 50 consecutive operating cycles. All performance indicators exceeded the 95% threshold commonly adopted as the acceptance criterion for industrial automation systems. The recorded failures were solely attributed to mechanical and pneumatic factors rather than to the PLC control logic. The proposed system provides a simple, reliable, and cost-effective automation solution with strong potential for implementation in small and medium-sized enterprises (SMEs) to improve productivity and ensure consistent marking quality on product packaging

Keywords: *Sequential Accuracy, Visual Inspection, Mitsubishi FX1N-40MR Programmable Logic Controller, Internet of Things (IoT), Automatic Stamping Machine.*

I. LATAR BELAKANG

Proses stamping atau pencetakan logo pada kemasan banyak dilakukan secara manual di lini produksi industri manufaktur, khususnya pada sektor pengemasan produk. Jika dilakukan secara manual oleh operator, proses ini dapat menimbulkan berbagai permasalahan seperti ketidakkonsistenan posisi cap, tekanan yang tidak merata antarsiklus, rendahnya kecepatan produksi, serta tingginya risiko kesalahan akibat kelelahan operator dalam jangka Panjang [1]. Kondisi ini berdampak langsung pada kualitas produk dan efisiensi produksi, khususnya pada industri kecil dan menengah yang masih mengandalkan tenaga manusia untuk proses penandaan kemasan.

Otomasi menjadi solusi yang semakin relevan untuk mengatasi keterbatasan proses manual tersebut. Programmable Logic Controller (PLC) telah lama diakui sebagai komponen utama dalam sistem otomasi industri karena kemampuannya menjalankan logika kontrol sekuensial secara deterministik, andal, dan real-time, dan tetap menjadi elemen inti arsitektur otomasi meskipun paradigma Industry 4.0 dan Industrial IoT terus berkembang [2]. PLC Mitsubishi seri FX1N-40MR merupakan salah satu PLC kelas mikro yang banyak digunakan pada skala industri kecil-menengah karena harganya terjangkau, pemrogramannya fleksibel, serta memiliki kemampuan integrasi yang baik dengan berbagai aktuator dan sensor [3]. Sistem pneumatik dipilih sebagai mekanisme penggerak utama karena menghasilkan gaya dorong yang besar, respons yang cepat, dan perawatan yang relatif mudah dibandingkan sistem hidrolik maupun elektromekanik.

A. Kajian Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji penerapan PLC pada sistem stamping dan proses sekuensial sejenis. [4] menunjukkan bahwa stamping otomatis bersifat reliable dan reproducible, mengurangi usaha manual dan mencegah bahaya kerja pada lingkungan berbahaya, namun evaluasi kinerjanya masih terbatas pada aspek fungsional. [5] dan [6] merancang sistem stamping otomatis berbasis PLC dengan penekanan pada perancangan mekanik dan wiring, tanpa pengukuran akurasi sekuensial maupun keandalan operasi kontinu secara kuantitatif. [7] mengembangkan sistem labeling dan stamping modular dengan integrasi konveyor menggunakan kontroler PLC, sementara [8] merancang self-acting stamper berbasis PLC untuk aplikasi sejenis.

Pada sisi kontrol sekuensial dan pneumatik, [9] mengembangkan sistem punching pneumatik sekuensial berbasis PLC, dan [10] mengkaji metode perancangan sistem kontrol logika pneumatik. [11] membahas optimasi sistem kontrol industri berbasis PLC dari sisi arsitektur program, sedangkan [12] merancang sistem monitoring pada mesin pengemasan pneumatik berbasis PLC dan HMI yang relevan dengan aspek antarmuka pemantauan pada penelitian ini.

Pada sisi integrasi PLC dengan IoT, [13] mengendalikan proses machining menggunakan PLC yang terhubung dengan modul ESP32 untuk pemantauan jarak jauh berbasis cloud, dan [14] mengintegrasikan PLC dengan kamera industri dan algoritma deep learning untuk pemantauan permukaan konveyor secara real-time. Studi-studi tersebut umumnya menggunakan PLC Siemens S7-1200, Allen-Bradley, atau Omron sebagai kontroler utama, sedangkan data empiris kinerja PLC seri Mitsubishi FX untuk aplikasi marking/stamping pada material lunak seperti kardus masih terbatas.

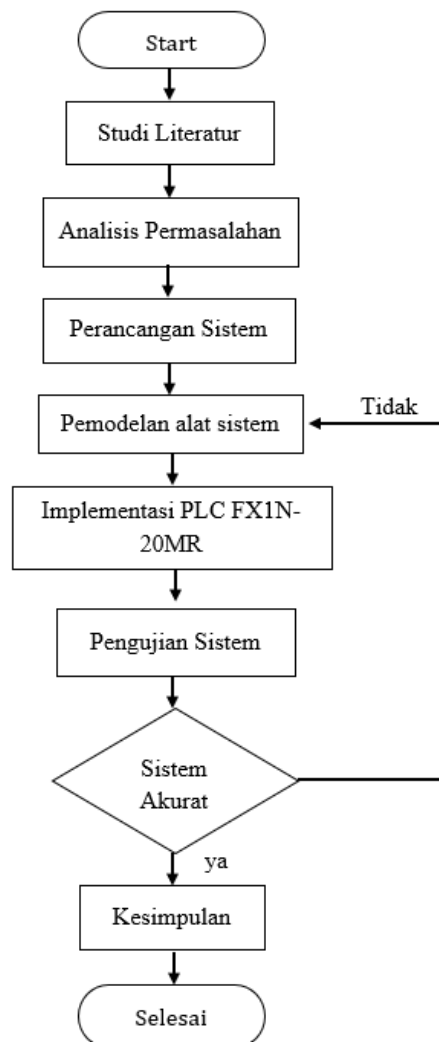
B. Kesenjangan dan Tujuan Penelitian

Sebagian besar penelitian terdahulu belum mengukur secara simultan tiga dimensi kinerja, yaitu akurasi sekuensial eksekusi program, konsistensi waktu siklus, dan keandalan operasional pada pengujian kontinu, sebagai satu kesatuan evaluasi. Kesenjangan (research gap) inilah yang menjadi dasar kebaruan penelitian ini, yaitu implementasi PLC Mitsubishi FX1N-40MR pada prototipe mesin stamping logo kemasan kardus dengan mekanisme self-inking rubber stamp berposisi tetap (fixed position), disertai evaluasi kinerja terukur pada ketiga dimensi tersebut, serta integrasi kendali jarak jauh berbasis ESP32-S3 dan web server sebagai pendukung paradigma Industry 4.0.

Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun prototipe mesin stamping otomatis berbasis PLC Mitsubishi FX1N-40MR dengan sistem pneumatik sebagai aktuator serta antarmuka kendali dan pemantauan berbasis IoT melalui modul ESP32-S3 yang terintegrasi dengan web server. Komunikasi antarkomponen dilakukan melalui relai elektromagnetik sebagai konverter level tegangan dari logika 3,3 V ke 24 V DC. Sistem dirancang untuk mendukung dua mode operasi, yaitu Mode Manual dan Mode Otomatis, sehingga dapat diadaptasi sesuai kebutuhan produksi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan solusi otomasi yang sederhana, andal, dan terjangkau bagi industri kecil dan menengah dalam meningkatkan konsistensi kualitas dan produktivitas proses stamping kemasan produk.

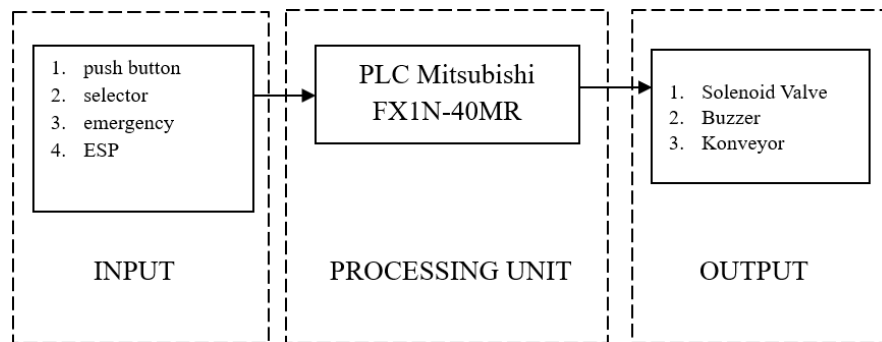
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D), yaitu metode penelitian yang berorientasi pada pengembangan produk berupa perangkat keras (hardware), perangkat lunak (software), atau kombinasi keduanya yang disesuaikan dengan kebutuhan tertentu dan divalidasi melalui pengujian empiris [15]. Karakteristik utama metode R&D adalah pendekatannya yang bersifat bertahap dan berkelanjutan, dimulai dari identifikasi kebutuhan, perancangan produk awal, pengembangan, pengujian, hingga penyempurnaan produk berdasarkan hasil evaluasi yang diperoleh [15]. Metode R&D dipilih karena penelitian ini berfokus pada perancangan sistem otomatis berbasis PLC Mitsubishi FX1N-40MR pada prototipe mesin stamping otomatis yang terintegrasi dengan sistem inspeksi visual berbasis kamera, serta dashboard monitoring.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Penelitian ini mencakup perancangan sistem kendali, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian kinerja sistem untuk mengevaluasi tingkat akurasi, keandalan, dan konsistensi operasinya.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Diagram blok pada Gambar 1 menggambarkan arsitektur sistem kontrol mesin stamping otomatis yang terdiri atas tiga blok fungsional, yaitu input, processing unit, dan output. Blok input terdiri atas push button, selector, emergency stop, dan modul ESP (ESP8266/ESP32) yang mengirimkan sinyal kontrol dari antarmuka web/IoT melalui relai. Sinyal-sinyal tersebut kemudian diproses oleh PLC Mitsubishi FX1N-40MR pada blok processing unit, yang bertindak sebagai pusat kendali sistem berdasarkan program ladder yang telah dirancang. Hasil pemrosesan PLC selanjutnya diteruskan ke blok output, yang meliputi solenoid valve untuk menggerakkan aktuator pneumatik, buzzer sebagai indikator status/peringatan, serta konveyor untuk memindahkan benda kerja.

Tabel 1 Perangkat Keras

No.	Nama Peralatan	Spesifikasi	Fungsi	Keterangan
1	Push Button	Kontak NO (Normally Open)	Input	Memulai dan menghentikan proses operasi normal sistem.
2	Selector Switch	Kontak NO (Normally Open)	Input	Memilih mode operasi otomatis atau manual.
3	Emergency Stop	Kontak NC (Normally Closed)	Input	Menghentikan seluruh sistem secara langsung dalam kondisi darurat.
4	Relay optocoupler	Relay 5v	Input	Input sinyal dari esp
5	PLC Mitsubishi FX1N-40MR	26 Input, 16 Output Relay, 24 V DC	Processing	Pengendali utama yang digunakan untuk memproses data masukan dan menjalankan logika sekuensial dalam mengendalikan sistem stamping otomatis.
6	Solenoid Valve	Tipe 5/2 Way, 24 V DC	Output	Mengendalikan aliran udara bertekanan untuk menggerakkan silinder pneumatik maju dan mundur.
7	Relay	Relay 24VDC	Output	Menggerakkan Konveyor

8	Buzzer	24 V DC	Output	Memberikan sinyal suara sebagai indikator
---	--------	---------	--------	---

Tabel 2. Perangkat Lunak

No.	Software	Versi	Keterangan
1	GX Works2 / GX Developer	Latest version	Software pemrograman PLC Mitsubishi
2	Microsoft Excel	2019/365	Pengolahan dan analisis data pengujian

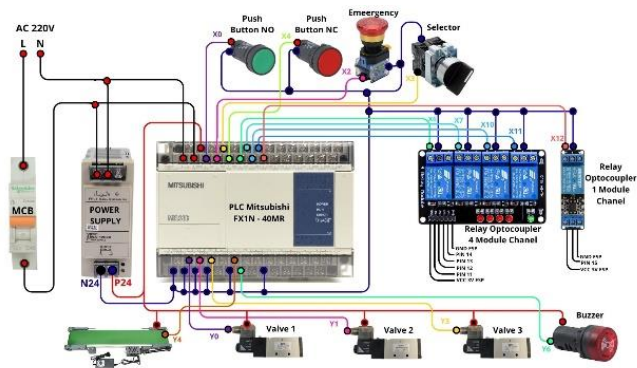
Tabel 3. Address Input PLC

No.	Alamat Input	Nama Perangkat	Jenis Perangkat
1	X000	Push Button Start	Tombol Fisik
2	X002	Emergency	Tombol Fisik
3	X003	Selector Switch	Tombol Fisik
4	X004	Push Button Stop	Tombol Fisik
5	X006	Input 1 ESP	Relay
6	X007	Input 2 ESP	Relay
7	X010	Input 3 ESP	Relay
8	X011	Input 4 ESP	Relay
9	X012	Input 5 ESP	Relay

Tabel 4 Tabel 3 Address Output PLC

No	Alamat Output	Nama Perangkat	Jenis Perangkat
1	Y000	Solenoid Valve 1	Katup Solenoid 24 V DC
2	Y001	Solenoid Valve 2	Katup Solenoid 24 V DC
3	Y002	Solenoid Valve 3	Katup Solenoid 24 V DC
4	Y004	Relay	Menggerakkan Konveyor
5	Y006	Buzzer	Buzzer 24 V DC

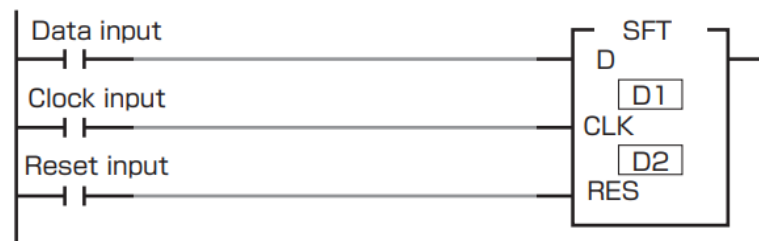
Tabel 1 hingga Tabel 3 merinci spesifikasi dan fungsi tiap komponen serta pemetaan alamat input/output PLC. Desain elektrik pada Gambar 2 menggambarkan konfigurasi pengkabelan sistem kendali, meliputi perangkat masukan seperti push button, selector switch, emergency stop, serta sinyal relai dari sistem inspeksi visual, dan koneksi perangkat keluaran yang terdiri atas katup solenoid pneumatik dan buzzer yang dikendalikan oleh PLC Mitsubishi FX1N-40MR



Gambar 3 Elektrik Diagram

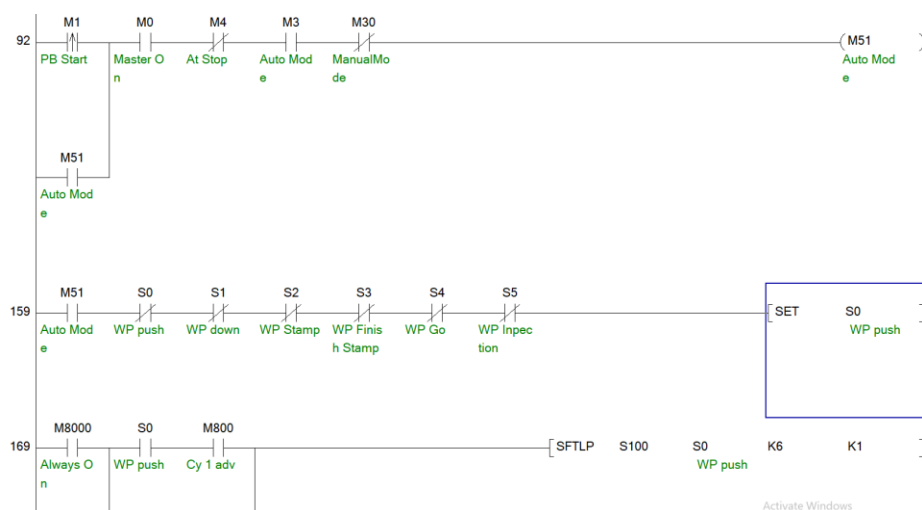
Kemudian Design elektrik Diagram pada gambar 2 tersebut menggambarkan konfigurasi pengkabelan sistem kendali berdasarkan alat yang nanti dipakai.

Ladder program



Gambar 4 Intruksi Shift Register (SFT)

Instruksi PLC yang digunakan untuk mengendalikan urutan operasi otomatis pada mesin ini adalah instruksi SFT (Shift Register), yang berfungsi menggeser data biner secara berurutan di dalam suatu register sehingga setiap bit dapat merepresentasikan tahapan proses tertentu dalam sistem kendali. Instruksi SFT diterapkan untuk mengendalikan urutan kerja aktuator pneumatik selama proses stamping otomatis, mulai dari tahap pengumpanan material, proses stamping, pemindahan produk ke konveyor, hingga persiapan siklus berikutnya.



Gambar 5 Program Intruksi Shift Register (SFT)

Bagian ini menjelaskan logika yang digunakan untuk menginisialisasi langkah pertama pada siklus operasi otomatis mesin. Aliran logika dimulai ketika mode otomatis diaktifkan, namun sebelum mesin menjalankan operasi pertama, serangkaian kontak pengaman disusun secara seri untuk memastikan bahwa mesin berada dalam kondisi siaga (standby) dan tidak sedang menjalankan proses sekuensial apa pun. Ketika seluruh kondisi tersebut terpenuhi, instruksi SET akan dieksekusi pada memori langkah S0. Berbeda dengan koil keluaran (output coil) konvensional, instruksi SET berfungsi mengaktifkan sekaligus mempertahankan status S0 tetap ON hingga menerima instruksi RESET, sehingga memastikan langkah pertama dalam urutan operasi tetap aktif dan stabil selama proses berlangsung hingga logika kendali memerintahkan perpindahan ke langkah berikutnya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem

Prototipe mesin stamping otomatis berhasil diimplementasikan dengan konfigurasi 9 saluran input (X0-X12) dan 5 saluran output (Y0-Y6) pada PLC Mitsubishi FX1N-40MR. Program ladder diagram menjalankan kendali sekuensial melalui instruksi shift register, dengan dua mode operasi (Manual dan Otomatis) yang dapat dipilih melalui selector switch. Integrasi ESP32-S3 melalui modul relai konverter tegangan terbukti berfungsi dengan baik: seluruh perintah master on, start, stop, emergency, dan loop trigger yang dikirim dari web server diterima dan dieksekusi oleh PLC sesuai rancangan.

B. Hasil Mode Manual

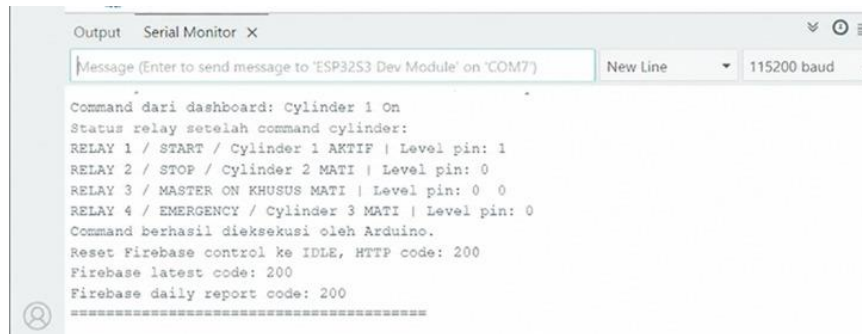
Pada Mode Manual, operator dapat mengendalikan pergerakan Silinder 1, Silinder 2, Silinder 3, dan konveyor secara individual melalui dashboard web tanpa menjalankan siklus otomatis penuh.

Tabel 5 Konfigurasi Sinyal Kendali Mode Manual dari Web Server

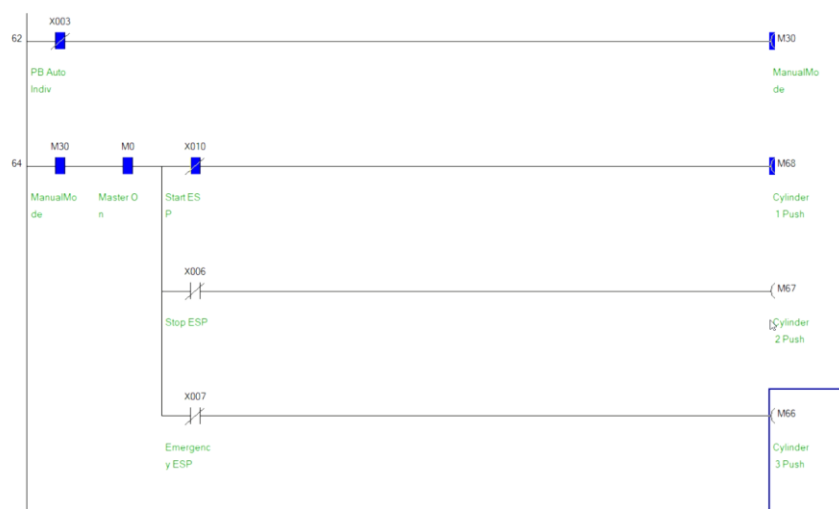
Perintah	Terminal PLC	Relay ESP32-S3
Cylinder 1 On/Off	X010	Relay 1 (Start)
Cylinder 2 On/Off	X006	Relay 2 (Stop)
Cylinder 3 On/Off	X007	Relay 4 (Emergency)
Konveyor On/Off	X000	Relay 24 Vdc (PB Start)

Mode ini digunakan untuk keperluan setup awal mesin, pengujian I/O secara terpisah, serta perawatan dan perbaikan komponen. Berbeda dengan Mode Otomatis yang menggunakan sinyal pulsa (pulse), sinyal kendali pada Mode Manual menggunakan mekanisme latch, yaitu relai tetap aktif (logika tinggi) selama perintah ON diberikan dan baru nonaktif setelah perintah OFF diterima, sehingga operator dapat menahan posisi silinder selama diperlukan untuk keperluan setup mekanis. Hasil verifikasi melalui serial monitor ESP32-S3 menunjukkan bahwa setiap perintah individual (Cylinder 1/2/3 On dan Off) berhasil dieksekusi sesuai rancangan, tanpa memengaruhi relai silinder lain. Interlock antaraktuator tetap aktif pada mode

ini untuk mencegah dua silinder bergerak maju secara bersamaan, sehingga kondisi berbahaya dapat dihindari meskipun kendali dilakukan secara manual.



Gambar 6 Serial Monitor ESP ketika mengirimkan input ke plc lewat relay Mode Manual



Gambar 7 Program Manual Mode

C. Hasil Mode Otomatis dan Sekuensial Proses

Mode Otomatis merupakan mode operasi utama pada saat mesin menjalankan siklus produksi. Pada mode ini, PLC mengeksekusi seluruh tahapan stamping secara berurutan dan berulang tanpa intervensi operator, menggunakan logika shift register yang menggeser bit step secara berurutan sehingga tahapan berikutnya baru dieksekusi setelah kondisi tahapan sebelumnya terpenuhi. Berbeda dengan Mode Manual yang menggunakan mekanisme latch, sinyal kendali dari web server pada Mode Otomatis menggunakan mekanisme pulsa (pulse) berdurasi singkat, karena perintah seperti Start, Stop, dan Master On hanya perlu memicu satu kali eksekusi, bukan menahan suatu kondisi.

Tabel 6 Konfigurasi Sinyal Kendali Mode Otomatis dari Web Server

Terminal	Sinyal	Fungsi
X006	Stop ESP	Menghentikan siklus otomatis secara normal
X007	Emergency ESP	Menghentikan seluruh sistem secara darurat dan mereset step flag
X010	Start ESP	Memulai siklus operasi otomatis

X011	Master ON	Syarat utama (enable) agar mesin dapat menyala/aktif; siklus tidak dapat dimulai apabila Master ON belum aktif
X012	Loop ESP	Sinyal trigger dari servo/kamera untuk memulai siklus berikutnya

Urutan pengoperasian Mode Otomatis diawali dengan pengiriman sinyal Master ON (X10) oleh operator untuk memastikan seluruh aktuatur berada pada posisi *home*, sekaligus sebagai syarat utama (*enable*) agar mesin dapat menyala/aktif. Selanjutnya, sinyal Start ESP (X7) dikirimkan untuk memulai siklus operasi. Selama siklus berlangsung, sinyal Loop ESP (X11) dari servo bersama sinyal inspeksi visual dari kamera berfungsi sebagai *trigger* yang menandakan bahwa mesin siap memulai siklus berikutnya. Penghentian sistem dapat dilakukan melalui dua cara: secara normal melalui sinyal Stop ESP (X4), yang akan menyelesaikan siklus yang sedang berjalan terlebih dahulu sebelum berhenti, atau secara darurat melalui sinyal Emergency ESP (X6), yang menghentikan seluruh aktuatur secara seketika dan mereset *step flag* ke kondisi awal.



Gambar 8 Serial Moniitor ESP Ketika Mengirimkan Input Ke Plc Lewat Relay Mode Otomatis



Gambar 9 Program Master ON Input Dari Esp Lewat Relay

Sekuensial (urutan step) Mode Otomatis dijalankan melalui enam step (S0-S5) yang saling terkunci melalui shift register, sebagaimana disajikan pada Tabel 6.

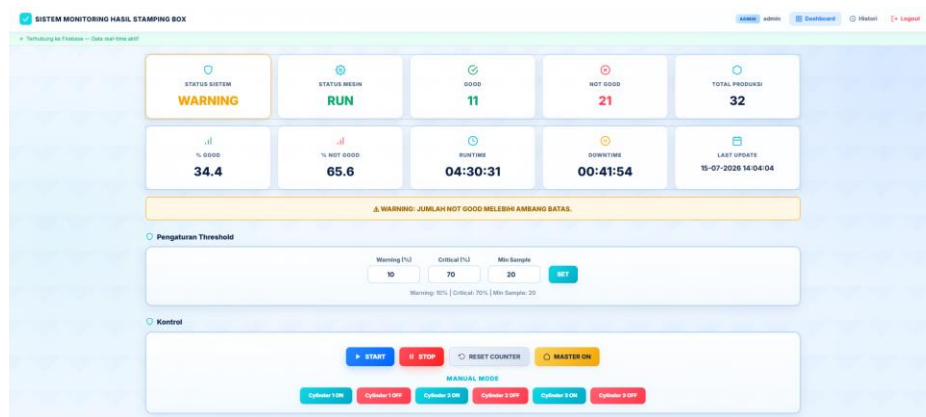
Tabel 7 Tahapan Sekuensial Mode Otomatis (Step S0-S5)

Step	Part	Aksi	Durasi	Fungsi
S0	Konveyor	Jalan (On)	Kontinu	Memindahkan dan menyortir box yang telah distamp
S0	Silinder 1	Maju	2 dtk	Mendorong box keluar dari magazine
S1	Silinder 1	Mundur	-	Kembali ke posisi home
S2	Silinder 2	Maju	5 dtk	Proses stamping (waktu tekan lebih lama)
S3	Silinder 2	Mundur	-	Kembali ke posisi home
S4	Silinder 3	Maju	2 dtk	Mendorong box masuk ke konveyor
S5	Silinder 3	Mundur	-	Kembali ke home; buzzer aktif 2 dtk

Setelah ketiga silinder menyelesaikan gerakannya dan kembali ke posisi home pada step S5, buzzer diaktifkan selama 2 detik sebagai indikator bahwa satu siklus stamping telah selesai. Sistem kemudian menunggu sinyal Loop ESP (X11) dari inspeksi visual kamera sebelum kembali ke step S0 untuk memproses benda kerja berikutnya, sehingga proses looping otomatis berjalan berkesinambungan selama Mode Otomatis aktif dan tidak ada perintah Stop atau Emergency yang diterima. Desain ini menjaga sifat deterministik PLC sebagai pengendali tunggal: seluruh logika step tetap diproses oleh PLC, sementara sinyal dari web server maupun kamera hanya berperan sebagai trigger eksternal, sehingga latensi jaringan pada sisi web tidak memengaruhi presisi waktu eksekusi program ladder diagram.

D. Antarmuka Web Monitoring IoT

Selain kendali jarak jauh, sistem dilengkapi dashboard web monitoring yang menampilkan status operasional mesin secara real-time melalui sinkronisasi data dengan Firebase. Dashboard menyajikan indikator Status Sistem, Status Mesin (Run/Stop), jumlah produk terklasifikasi Good dan Not Good beserta persentasenya, Total Produksi, Runtime, Downtime, dan waktu pembaruan data terakhir (Last Update). Dashboard juga menyediakan menu Pengaturan Threshold berupa nilai Warning (%), Critical (%), dan Min Sample yang dapat disesuaikan operator, serta menampilkan notifikasi otomatis apabila jumlah produk Not Good melampaui ambang batas yang ditetapkan. Pada bagian Kontrol, dashboard menyediakan tombol Start, Stop, Reset Counter, dan Master On untuk mengendalikan siklus Mode Otomatis, serta bagian Manual Mode dengan tombol individual Cylinder 1/2/3 On dan Off yang bekerja sesuai pemetaan sinyal kendali pada Tabel 4 dan Tabel 5.



Gambar 9. Antarmuka Web Dashboard Monitoring dan Kontrol Sistem

Klasifikasi Good/Not Good pada dashboard merupakan hasil dari subsistem inspeksi visual berbasis kamera yang terintegrasi dalam proyek stamping box secara keseluruhan, dengan pendekatan yang sejalan dengan sistem deteksi cacat kemasan berbasis algoritma YOLO yang dilaporkan mampu mengklasifikasikan kualitas produk secara real-time pada lini produksi [16], namun subsistem inspeksi visual ini terpisah dari pengujian akurasi sekuensial dan keandalan operasional PLC yang menjadi fokus utama penelitian ini; angka pada dashboard merupakan cuplikan (snapshot) tampilan saat berjalan, bukan hasil pengujian formal pada penelitian ini. Dengan demikian, dashboard berfungsi sebagai antarmuka terpadu yang menggabungkan pemantauan kondisi produksi dan kendali langsung terhadap PLC melalui modul ESP32-S3.

E. Akurasi Sekuensial Program PLC

Pengujian akurasi sekuensial dilakukan pada tujuh tahapan proses selama 30 siklus (210 eksekusi tahapan). Dari 210 eksekusi tahapan yang diuji, diperoleh 209 eksekusi berhasil dan satu kegagalan (99,6% akurasi keseluruhan). Kegagalan tunggal terjadi pada tahapan Silinder 2 mundur, disebabkan oleh tekanan udara kompresor yang turun sementara ke 1,3 bar, di bawah ambang operasional 2,5 bar, sehingga solenoid valve tidak memperoleh tekanan yang cukup untuk menggerakkan silinder.

Tabel 8 Akurasi Sekuensial Tahapan Proses Stamping (n = 30 siklus)

No.	Tahapan	Berhasil/Diuji	Akurasi
1	Silinder 1 maju	30/30	100,0%
2	Silinder 1 mundur	30/30	100,0%
3	Silinder 2 maju	30/30	100,0%
4	Silinder 2 mundur	29/30	96,7%
5	Silinder 3 maju	30/30	100,0%
6	Silinder 3 mundur	30/30	100,0%
7	Buzzer aktif	30/30	100,0%
	Total 7 tahapan	209/210	99,6%

Nilai akurasi 99,6% ini melampaui ambang batas minimum 95% yang lazim digunakan sebagai kriteria keberhasilan sistem kontrol proses industri, membuktikan bahwa implementasi ladder diagram sekuensial pada PLC Mitsubishi FX1N-40MR mampu menjaga konsistensi urutan proses. Analisis waktu siklus pada 30 pengujian yang sama menghasilkan rata-rata waktu siklus 10-11 detik dengan simpangan baku 0,05 detik dan koefisien variasi (CV) 0,31%, jauh di bawah toleransi umum proses industri sebesar 5%, sehingga sistem dinyatakan stabil secara statistik. Selisih antara waktu aktual rata-rata dan nilai teoretis berdasarkan total timer PLC (11 detik) sebesar 0,26 detik menghasilkan ketepatan waktu siklus sebesar 98,4%, yang juga melampaui ambang batas 95%. Selisih ini terutama disebabkan oleh waktu tunda mekanis pada aktuator, respons katup pneumatik, dan perpindahan material selama proses berlangsung, bukan oleh keterlambatan eksekusi program PLC.

F. Keandalan Sistem

Pengujian keandalan dilakukan dengan menjalankan sistem secara kontinu selama 50 siklus yang terbagi dalam 5 sesi. Sistem berhasil menyelesaikan 49 dari 50 siklus stamping yang direncanakan (success rate 98,0%), melampaui ambang batas minimum keandalan 95%. Satu kegagalan pada sesi II terjadi karena kardus tertahan di dalam magazine akibat perbedaan ukuran atau dimensi kardus dari spesifikasi yang ditentukan, sehingga proses feeding material tidak berjalan lancar.

Tabel 9 Rekap Keandalan Sistem per Sesi Pengujian (n = 50 siklus)

Sesi	Siklus	Berhasil	Success Rate
I	1-10	10/10	100,0%
II	11-20	9/10	90,0%
III	21-30	10/10	100,0%
IV	31-40	10/10	100,0%
V	41-50	10/10	100,0%
Total	1-50	49/50	98,0%

Berdasarkan klasifikasi akar penyebab, seluruh kegagalan yang tercatat selama pengujian akurasi maupun keandalan bersumber dari faktor mekanis dan pneumatik pendukung (fluktuasi tekanan udara dan penanganan material), tidak ditemukan kegagalan yang berasal dari logika program PLC maupun komponen elektronik kendali. Sistem pengaman emergency stop juga diuji terpisah dan menunjukkan respons penghentian yang tepat dan aman pada seluruh kondisi darurat yang disimulasikan.

G. Pembahasan

Seluruh parameter kinerja yang diukur, yaitu akurasi sekuensial (99,6%), ketepatan waktu siklus (98,4%), success rate keandalan (98,0%), dan koefisien variasi waktu siklus (0,31%), memenuhi atau melampaui kriteria keberhasilan yang ditetapkan. Hasil ini menunjukkan bahwa arsitektur ladder diagram berbasis shift register yang diterapkan pada PLC Mitsubishi FX1N-40MR efektif menjaga urutan dan konsistensi proses stamping, sejalan dengan

karakteristik PLC sebagai pengendali proses industri yang beroperasi secara deterministik. Keberhasilan integrasi ESP32-S3 dengan web server turut menunjukkan bahwa PLC dapat difungsikan sebagai kontrol utama yang tetap kompatibel dengan kebutuhan kendali dan pemantauan jarak jauh berbasis IoT, tanpa mengurangi determinisme dan keandalan kendali sekuensialnya.

Faktor yang perlu diperhatikan pada penerapan lebih lanjut meliputi stabilitas tekanan udara pneumatik dan presisi penanganan material saat feeding. Penambahan sensor tekanan yang terintegrasi dengan logika PLC serta guide rail dan verifikasi sensor ganda pada jalur pemuatan konveyor direkomendasikan untuk mengurangi kegagalan serupa pada penerapan skala produksi. Pengujian pada penelitian ini juga dibatasi hingga 50 siklus mengingat batas durabilitas operasi kontinu konveyor prototipe (sekitar 50 menit), sehingga hasil keandalan yang diperoleh mencerminkan kondisi pengujian prototipe berdurasi terbatas dan belum sepenuhnya merepresentasikan operasi jangka panjang pada skala industri.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan prototipe sistem otomasi mesin stamping berbasis PLC Mitsubishi FX1N-40MR dengan Mode Manual dan Otomatis, interlock, emergency stop, serta antarmuka web melalui modul ESP32-S3 untuk kendali dan pemantauan jarak jauh. Sistem terbukti akurat, tepat waktu, dan andal, dengan kegagalan yang tercatat berasal dari faktor eksternal, bukan dari logika program. Keterbatasan penelitian meliputi belum adanya deteksi otomatis tekanan pneumatik, verifikasi sensor ganda pada konveyor, skala pengujian yang masih terbatas, serta belum terintegrasinya inspeksi visual dan monitoring IoT. Penelitian lanjutan disarankan mengatasi keterbatasan tersebut guna mewujudkan ekosistem otomasi stamping yang sejalan dengan Industry 4.0.

V. REFERENSI

- [1] Gaurav Sarraf, "Introduction to PLC Programming for Industrial Automation," Think Robotics. [Online]. Available: <https://thinkrobotics.com/blogs/learn/introduction-to-plc-programming-for-industrial-automation>
- [2] F. J. Folgado, D. Calderón, I. González, and A. J. Calderón, "Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends," *Electron.*, vol. 13, no. 4, 2024, doi: 10.3390/electronics13040782.
- [3] D. Supply, "Micro PLC comparison from Allen Bradley, Mitsubishi, Omron," DO supply. [Online]. Available: <https://www.dosupply.com/tech/2023/12/03/micro-plc-comparison-from-allen-bradley-mitsubishi-omron/>
- [4] N. J. Tongale, N. D. Kamble, S. A. Joshi, S. S. Jadhav, A. S. Bhaisare, and A. Professor, "Automatic Stamping Machine Using Plc," *Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng. Impact Factor 7.047*, vol. 10, no. 4, pp. 104–109, 2022, doi: 10.17148/IJIREEICE.2022.10420.
- [5] D. O. Patil, S. T. Sanamdikar, S. Gorve, and N. Dinde, "PLC-Based Automatic Stamping System," *IJCRT*, vol. 12, no. 5, pp. 104–107, 2024.
- [6] K. Dhenge, "Plc : Based On Automatic Stamping And Labelling Machine," *IJCRT*, vol.

- 13, no. 4, pp. 251–254, 2025.
- [7] R. Gopalakrishnan, S. Aneesh, K. Chandra mouli, and S. Logeshkumar, “Modular Industrial Labeling and Stamping System with Conveyor Integration Using PLC Controller,” *Int. Res. J. Adv. Eng. Hub*, vol. 3, no. 03, pp. 760–767, 2025, doi: 10.47392/irjaeh.2025.0106.
- [8] M. G. Rajitha, M. N. Goud, A. S. Reddy, and C. H. H. Reddy, “DESIGNING OF THE SELF-ACTING STAMPER USING PLC,” *IRJMETs*, no. 05, pp. 6738–6740, 2024.
- [9] S. B. Murthy, N. Pothula, D. M. S. Sreenivasa Rao, and N. K. G. Ranga, “Development of PLC based Sequential Pneumatic Punching System,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1057, no. 1, p. 012079, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1057/1/012079.
- [10] W. Liu and Q. Sun, “Research on a design method of pneumatic logic control system,” *Meas. Control (United Kingdom)*, vol. 54, no. 5–6, pp. 1105–1112, 2021, doi: 10.1177/00202940211020336.
- [11] H. Zhang, I. Automation, and I. Manufacturing, “Optimization and Innovation of Industrial Control Systems Based on PLC,” *Adv. Comput. Signals Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 12–19, 2024, doi: 10.23977/acss.2024.080403.
- [12] M. D. Pratama, Yurika, and Saripudin, “Sistem Monitoring Pada Rancang Bangun Mesin Pengemasan Benda dengan Sistem Pneumatik Berbasis PLC dan HMI,” *Tedc*, vol. 18, no. 3, pp. 170–177, 2024.
- [13] Benediktus, S. Aryza, and A. Dani, “Analysis of the Implementation of PLC- and Iot Based Automatic Control Systems in Optimizing the Chemical Mixing Process at PT RAPP,” vol. 16, no. 01, pp. 182–191, 2026.
- [14] R. Wang *et al.*, “PLC based laser scanning system for conveyor belt surface monitoring,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–26, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-78985-0.
- [15] Sugiyono, *Metodologi Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R & D*. 2019.
- [16] T. T. H. Vu, D. L. Pham, and T. W. Chang, “A YOLO-based Real-time Packaging Defect Detection System,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 217, no. 2022, pp. 886–894, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.12.285.