RANCANG BANGUN SISTEM KONVEYOR *PACKAGING* BOTOL *SAMPLING* BERBASIS PLC SIEMENS S7-1200 DENGAN MONITORING HMI

Hasanudin Mubarokh[1], Miftakhul Huda[2]

[1,2] Program Studi Teknik Elektronika Kampus Kediri, Politeknik Negeri Malang, Indonesia
Email: [1]hasankeren31@email.com, [2]miftakhul.huda@polinema.ac.id

Nomor Handphone : 085856545666

Abstrak

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem konveyor packaging botol sampling berbasis PLC Siemens S7-1200 dengan monitoring Human Machine Interface (HMI). Sistem dirancang untuk mengotomatisasi proses pemindahan, pendeteksian, perhitungan, dan pemindahan jalur botol pada skala laboratorium. Komponen yang digunakan meliputi sensor photoelektrik untuk mendeteksi dan menghitung botol, sensor proximity untuk mendeteksi botol terakhir, servo MG996R sebagai mekanisme pemindah jalur, serta encoder KY-40 dan Arduino Nano untuk memonitor RPM motor konveyor. PLC Siemens S7-1200 berfungsi sebagai pengendali utama, sedangkan HMI menampilkan kondisi operasi, status sensor, nilai counting, dan RPM secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan sensor photoelektrik mampu mendeteksi botol pada jarak 1–2 cm dan sensor proximity pada jarak 2 mm. Kecepatan motor dapat dipertahankan mendekati acuan 32 RPM, meskipun arus dan daya meningkat saat beban bertambah. Sinkronisasi counting dan servo menunjukkan posisi 40° untuk botol ke-1 hingga ke-3 dan 85° untuk botol ke-4 hingga ke-6. Sistem menghasilkan akurasi perpindahan jalur sebesar 100% dan mampu menjalankan seluruh proses sesuai urutan yang dirancang.

Kata kunci: Konveyor, PLC Siemens S7-1200, HMI, Sensor Photoelektrik, Sensor Proximity.

Abstract

This study aims to design and implement a bottle sampling packaging conveyor system based on a Siemens S7-1200 PLC with a Human Machine Interface (HMI) for monitoring. The system is designed to automate the processes of bottle transfer, detection, counting, and lane switching on a laboratory scale. The components used include photoelectric sensors to detect and count bottles, proximity sensors to detect the last bottle, an MG996R servo motor as the lane-switching mechanism, and a KY-40 encoder and Arduino Nano to monitor the conveyor motor's RPM. A Siemens S7-1200 PLC serves as the main controller, while the HMI displays operating conditions, sensor status, count values, and RPM in real time. Test results show that the photoelectric sensor can detect bottles at a distance of 1–2 cm and the proximity sensor at a distance of 2 mm. The motor speed can be maintained close to the target of 32 RPM, even though current and power increase as the load increases. Synchronization of the counting and servo systems indicates positions of 40° for bottles 1 through 3 and 85° for bottles 4 through 6. The system achieves 100% lane-switching accuracy and is capable of executing the entire process according to the designed sequence.

Keywords: *Conveyor, Siemens S7-1200 PLC, HMI, Photoelectric Sensor, Proximity Sensor.*

This work is an open access article and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pada era modern semakin pesat, khususnya di bidang industri. Salah satu bentuk perkembangan tersebut adalah sistem otomasi yang dirancang untuk mempermudah proses produksi. Melalui sistem ini, keterlibatan tenaga kerja beralih peran menjadi pengendali proses produksi. Oleh karena itu, saat ini banyak industri yang mengimplementasikan PLC (*Programmable Logic Controller*) sebagai komponen utamanya[1]. Hal ini dikarenakan PLC memiliki kemudahan dalam pemrograman serta dilengkapi dengan perangkat keras (*hardware*) berupa masukan (input) dan keluaran (output) untuk mengintegrasikan sensor, relai, serta aktuator. Pada industri manufaktur, salah satu penerapan sistem otomasi yang paling banyak digunakan adalah sistem konveyor. Sistem konveyor berfungsi sebagai media pemindahan material atau produk dari satu proses ke proses berikutnya secara otomatis sehingga mampu mengoptimalkan kinerja, mengurangi waktu produksi, dan meminimalkan kesalahan akibat faktor manusia. Sistem konveyor banyak diterapkan pada proses packaging karena mampu menjaga kontinuitas aliran produk selama proses pengemasan berlangsung. Proses *packaging* merupakan tahapan penting dalam industri karena berfungsi untuk mengelompokkan, menghitung, dan mengemas produk agar siap didistribusikan. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi PLC pada sistem konveyor *packaging* mampu meningkatkan kecepatan, ketepatan proses perhitungan produk, serta keandalan sistem dibandingkan proses manual[2]. Pada skala industri besar, penggunaan PLC umumnya diintegrasikan dengan HMI (*Human Machine Interface*) sebagai media interaksi antara operator dan sistem kendali. HMI merupakan suatu sistem antarmuka yang memungkinkan komunikasi antara manusia dengan mesin melalui tampilan visual yang mudah dipahami. Melalui HMI, kondisi dan proses kerja sistem dapat divisualisasikan secara real-time sehingga memudahkan operator dalam melakukan pemantauan, pengendalian, dan pengoperasian peralatan[3]. Selain itu, desain tampilan HMI dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi sehingga mampu meningkatkan kinerja di lingkungan industri. Dengan demikian, penerapan HMI bertujuan untuk mengoptimalkan komunikasi antara pengguna dan mesin melalui penyajian informasi sistem yang akurat, interaktif, dan mudah diakses.

Perkembangan teknologi di dunia industri yang begitu cepat perlu diimbangi dengan kemajuan di bidang pendidikan. Pendidikan memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas dan kompetensi sumber daya manusia (SDM)[4]. Oleh karena itu, lulusan Program Studi Teknik Elektronika PSDKU POLINEMA Kediri diharapkan memiliki kemampuan dalam merancang, merencanakan, menginstal, serta melakukan pemeliharaan dan perbaikan sistem industri agar mampu mengikuti perkembangan teknologi yang terus berkembang. Salah satu kompetensi yang harus dikuasai oleh lulusan adalah pemahaman mengenai sistem otomasi industri. Dasar-dasar sistem otomasi industri telah diberikan melalui mata kuliah Otomasi Industri yang berada di Laboratorium Teknik Elektronika. Namun, masih terdapat keterbatasan sarana praktik yang dapat digunakan sebagai media visualisasi dalam proses pembelajaran. Selama ini, pembelajaran lebih banyak berfokus pada penggunaan PLC sehingga kurang memberikan gambaran nyata mengenai penerapan sistem otomasi. Kondisi tersebut menyebabkan sebagian mahasiswa mengalami kesulitan dalam memahami konsep otomasi industri secara menyeluruh dan menurunkan minat belajar selama proses pembelajaran berlangsung.

Dari permasalahan tersebut, diperlukan sebuah alat perancangan miniplant sistem industri yang dapat mensimulasikan proses produksi secara nyata, khususnya melalui sistem konveyor untuk *packaging* botol sampling. Fokus dari sistem ini meliputi tahapan pemindahan botol, perhitungan jumlah botol, pemisahan jalur, hingga proses pengumpulan produk pada area packaging. Dalam rancang bangun sistem ini, PLC Siemens S7-1200 dipilih sebagai pengendali utama karena memiliki kecepatan pemrosesan yang baik, bahasa pemrograman yang komplek, komunikasi Ethernet terintegrasi, serta mendukung berbagai protokol komunikasi industri sehingga sesuai digunakan sebagai media pembelajaran otomasi industri. PLC ini mengintegrasikan sensor photoelektrik untuk menghitung jumlah botol, sensor proximity untuk mendeteksi keberadaan botol pada area collecting sekaligus memberikan perintah kepada PLC untuk menghentikan motor DC, serta motor servo yang

berfungsi sebagai aktuator pemindah jalur konveyor[5]. Sebagai media antarmuka operator digunakan HMI Kinco, bukan Simatic HMI bawaan Siemens, karena HMI Kinco memiliki biaya yang lebih murah, kompatibel dengan PLC Siemens melalui komunikasi Ethernet menggunakan protokol S7 Communication maupun Modbus TCP, serta menyediakan perangkat lunak Kinco DTools yang mudah digunakan untuk proses perancangan tampilan monitoring dan kontrol. Penggunaan HMI Kinco juga memberikan pengalaman dan meningkatkan kopetensi mahasiswa dalam mengembangkan sistem otomatsi yang lebih aplikatif[6].

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, penelitian ini mengembangkan sebuah sistem dengan judul Rancang Bangun Sistem *Packaging* Botol *Sampling* Berbasis PLC Siemens S7-1200 dengan Monitoring HMI. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang konveyor otomatis yang dikendalikan oleh PLC untuk mengatur pergerakan jalur botol sesuai hasil hitungan sensor, serta memanfaatkan HMI sebagai perangkat antarmuka. Melalui implementasi sistem konveyor ini, diharapkan kualitas pembelajaran di laboratorium dapat meningkat, sekaligus memberikan pemahaman mendalam serta pengalaman praktis bagi mahasiswa mengenai sistem otomasi industri.

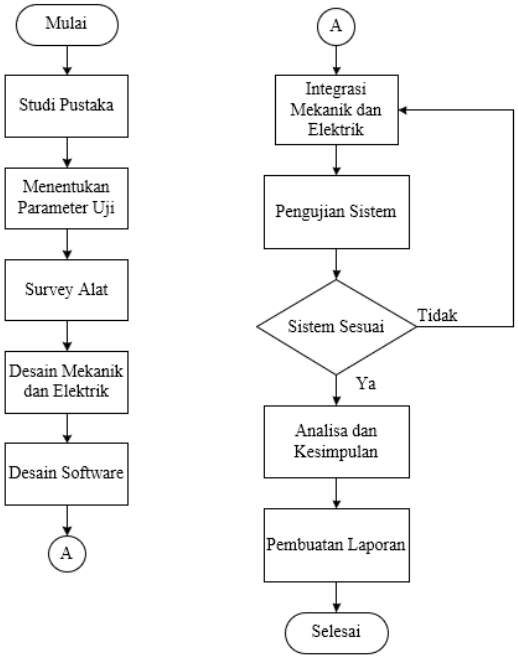
2. METODE PENELITIAN

2.1 Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* yaitu metode yang bertujuan pada riset, pengembangan, serta menguji produk yang dapat digunakan secara efektif. Dalam penelitian ini difokuskan pengembangan sistem konveyor *packaging* botol *sampling* yang dikendalikan PLC siemens s7-1200. Proses penelitian meliputi tahapan perancangan sistem mekanik, sistem elektrik dan pemrograman PLC, pengujian kinerja sistem tanpa ada kerusakan, serta penyempurnaan berdasarkan hasil uji coba hingga diperoleh sistem yang optimal dan siap diterapkan di lingkungan industri maupun pendidikan[7].

2.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini menggambarkan langkah-langkah alur dari tahap awal hingga akhir dalam penelitian, serta menentukan tujuan dan orientasi tugas akhir. Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

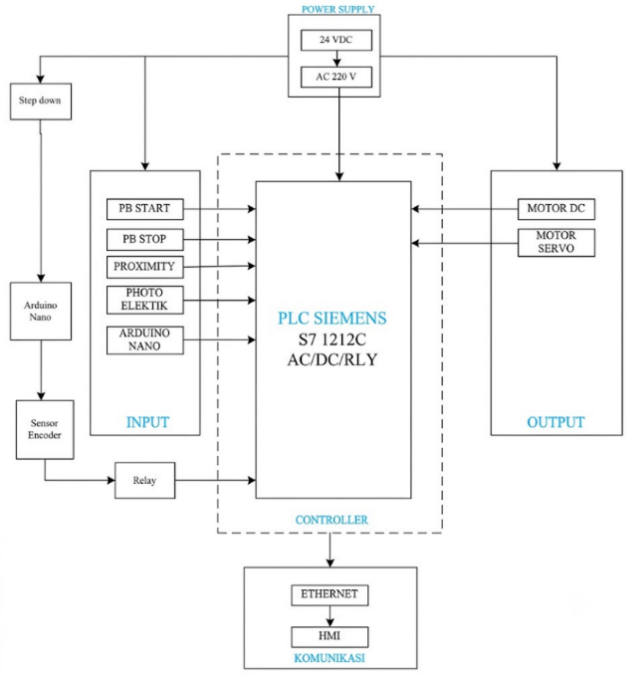


Gambar 1. Tahapan Penelitian

Berdasarkan Gambar 1, penelitian diawali dengan identifikasi masalah yang menjadi dasar perancangan sistem. Selanjutnya dilakukan studi literatur untuk memperoleh referensi yang berkaitan dengan PLC, HMI, sensor, motor konveyor, dan motor servo. Tahap berikutnya adalah perancangan hardware dan software, kemudian dilakukan implementasi sistem. Sistem yang telah dirancang selanjutnya diuji untuk mengetahui kinerja masing-masing komponen dan keseluruhan sistem. Data hasil pengujian dianalisis untuk memperoleh kesimpulan penelitian.

2.3 Diagram Blok Sistem

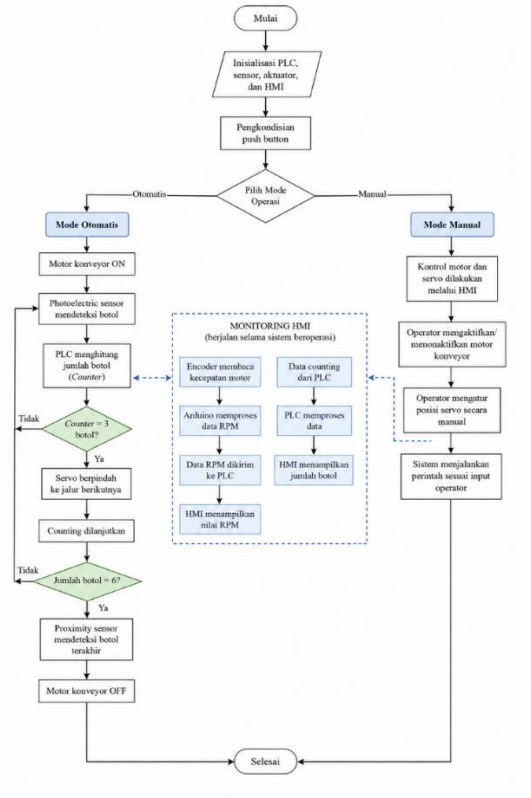
Diagram blok sistem ini digunakan untuk mempermudah proses analisa, khususnya dalam memahami hubungan antar komponen baik di dalam satu blok maupun antar blok, sehingga alur kerja sistem dapat dijelaskan secara sistematis dan terstruktur sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

2.4 Flowchart Sistem

Flowchart sistem digunakan untuk menggambarkan alur kerja sistem konveyor packaging botol secara keseluruhan, mulai dari proses inisialisasi hingga sistem selesai beroperasi. Alur sistem meliputi proses pengendalian motor konveyor, pendeteksian dan perhitungan botol menggunakan sensor photoelectric, perpindahan jalur menggunakan servo, serta pendeteksian botol menggunakan sensor proximity. Sistem juga dilengkapi monitoring melalui HMI untuk menampilkan data jumlah botol dan kecepatan motor konveyor.



Gambar 3. Flowchart Sistem

Berdasarkan Gambar 3, sistem diawali dengan proses inisialisasi PLC, sensor, aktuator, dan HMI, kemudian dilakukan pengkondisian push button dan pemilihan mode operasi. Pada mode otomatis, motor konveyor akan aktif dan sensor photoelectric mendeteksi serta menghitung botol. Ketika jumlah botol mencapai tiga, servo berpindah untuk mengarahkan botol ke jalur berikutnya. Proses counting kemudian dilanjutkan hingga mencapai enam botol, selanjutnya sensor proximity mendeteksi botol terakhir dan motor konveyor dihentikan. Pada mode manual, pengoperasian motor dan servo dilakukan melalui HMI. Selama sistem beroperasi, data RPM motor dan jumlah botol ditampilkan pada HMI sebagai informasi monitoring.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem konveyor packaging botol yang telah dirancang dan diimplementasikan. Hasil pengujian meliputi kinerja sensor, kecepatan motor konveyor, pergerakan servo, proses perhitungan botol, serta kinerja sistem secara keseluruhan. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui tingkat keberhasilan dan kinerja sistem berdasarkan parameter pengujian yang telah ditentukan.

3.1. Pengujian Sensor Photoelektrik

Pengujian sensor photoelektrik dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi objek pada sistem konveyor dengan jarak yang telah ditentukan yaitu 2 cm.

Tabel 1. Pengujian Sensor Photoelektrik

No	Jarak sensor (cm)	percobaan	Botol yang dilewatkan	Botol terdeteksi	Hasil
1	2	1	6	6	Berhasil
2	2	2	6	6	Berhasil
3	2	3	6	6	Berhasil
4	2	4	6	6	Berhasil
5	2	5	6	6	Berhasil

6	2	6	6	6	Berhasil
7	2	7	6	6	Berhasil
8	2	8	6	6	Berhasil
9	2	9	6	6	Berhasil
10	2	10	6	6	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 1 sensor photoelektrik mampu mendeteksi seluruh botol yang melewati sensor pada jarak 2 cm dengan tingkat akurasi sebesar 100%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jarak kerja yang digunakan pada sistem telah sesuai dengan karakteristik sensor sehingga proses pendeteksian berlangsung secara stabil tanpa terjadi kegagalan pembacaan. Oleh karena itu, sensor photoelektrik mampu digunakan untuk proses counting botol pada sistem konveyor.

3.2. Pengujian Sensor Proximity

Pengujian sensor proximity dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi keberadaan botol pada jarak kerja yang telah ditetapkan, yaitu 2 mm.

Tabel 2. Pengujian Sensor Proximity

No	Jarak sensor (mm)	Percobaan	Status sensor	Respon sistem	Keberhasilan
1	2	1	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
2	2	2	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
3	2	3	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
4	2	4	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
5	2	5	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
6	2	6	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
7	2	7	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
8	2	8	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
9	2	9	ON	Konveyor berhenti	Berhasil
10	2	10	ON	Konveyor berhenti	Berhasil

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, sensor proximity mampu mendeteksi keberadaan botol secara konsisten pada jarak 2 mm dengan tingkat akurasi sebesar 100%. Sensor menghasilkan sinyal keluaran (ON) setiap kali botol berada pada area deteksi sehingga PLC dapat menerima informasi keberadaan botol sebagai pemicu timer dan penghentian motor konveyor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jarak kerja 2 mm merupakan posisi yang sesuai untuk memastikan proses penghentian konveyor berlangsung secara stabil dan sesuai dengan rancangan sistem.

3.3 Pengujian Motor Konveyor

Pengujian motor konveyor dilakukan untuk mengetahui kinerja motor DC gearbox dalam menggerakkan belt konveyor pada kondisi operasi sistem. Parameter yang diuji meliputi kecepatan putaran motor (RPM) menggunakan tachometer digital. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan pada kondisi sistem beroperasi normal.

Tabel 3. Pengujian Motor Konveyor

No	RPM Acuan	RPM Hasil Pengukuran	Selisih (RPM)	Akurasi (%)
1	32	31,1	0,9	2,8
2	32	31,1	0,9	2,8
3	32	31,7	0,3	0,9
4	32	31,8	0,2	0,62
5	32	31,8	0,2	0,62
6	32	30.9	1,1	3,4
7	32	31,8	0,2	0,62
8	32	31,8	0,2	0,62
9	32	30,9	1,1	3,4
10	32	31,8	0,2	0,62

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, motor DC gearbox mampu menghasilkan kecepatan rata-rata sebesar 31,8 RPM dari kecepatan acuan 32 RPM. Selisih sebesar 0,2 RPM menunjukkan bahwa motor bekerja dengan baik dan memiliki tingkat kesalahan yang kecil, yaitu sekitar 0,62%. Perbedaan tersebut masih berada dalam batas toleransi dan tidak memengaruhi proses perpindahan botol pada konveyor.

3.4 Pengujian Daya Motor

Pengujian daya motor konveyor dilakukan untuk mengetahui besarnya konsumsi daya listrik motor gearbox GL06E pada kondisi tanpa beban dan saat ada beban.

Tabel 4. Pengujian Daya Motor

No	Jumlah botol	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
1	0 (tanpa beban)	24	0,40	9,60
2	2	24	0,42	10,80
3	4	24	0,52	12,48
4	6	24	0,60	14,40

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, motor gearbox GL06E dioperasikan dengan kecepatan acuan sebesar 32 RPM. Pada kondisi tanpa beban, motor mengonsumsi arus sebesar 0,40 A dengan daya 9,60 W. Ketika jumlah botol pada konveyor bertambah menjadi 2, 4, dan 6 botol, arus meningkat berturut-turut menjadi 0,45 A, 0,52 A, dan 0,60 A, sehingga daya listrik yang dikonsumsi juga meningkat menjadi 10,80 W, 12,48 W, dan 14,40 W. Peningkatan arus dan daya tersebut disebabkan oleh bertambahnya beban mekanis pada konveyor. Semakin banyak botol yang diangkut, semakin besar torsi yang harus dihasilkan motor untuk mempertahankan kecepatan operasi yang mengacu pada 32 RPM.

3.5 Pengujian Sinkronisasi Proses Counting dan Pergerakkan Motor

Pengujian sinkronisasi proses counting terhadap pergerakan motor servo dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara hasil perhitungan jumlah botol dengan perpindahan posisi motor servo pada sistem konveyor. Pada penelitian ini, proses counting dilakukan menggunakan Arduino Nano berdasarkan sinyal yang diterima dari sensor photoelektrik. Nilai counter digunakan sebagai acuan dalam mengendalikan posisi motor servo MG996R. Servo tetap berada pada posisi 40°/jalur 1 ketika nilai counter berada pada rentang 1 hingga 3, kemudian berpindah ke posisi 85°/jalur 2 saat nilai counter berubah menjadi 4 hingga 6. Setelah satu siklus selesai, nilai counter direset sehingga servo kembali ke posisi awal.

Tabel 5.Pengujian Sinkronisasi Proses Counting dan Pergerakan Motor

No	Jumlah Botol Terdeteksi	Nilai counter HMI	Posisi servo yang diharapkan	Posisi servo aktual	akurasi
1	Botol ke-1	1	40°(jalur 1)	40°	100%
2	Botol ke-2	2	40°(jalur 1)	40°	100%
3	Botol ke-3	3	40°(jalur 1)	40°	100%
4	Botol ke-4	4	85°(jalur 2)	85°	100%
5	Botol ke-5	5	85°(jalur 2)	85°	100%
6	Botol ke-6	6	85°(jalur 2)	85°	100%
7	Botol ke-7	Reset	40° (Posisi awal)	40°	100%
8	Botol ke-8	1	40°(jalur 1)	40°	100%
9	Botol ke-9	2	40°(jalur 1)	40°	100%
10	Botol ke-10	3	40°(jalur 1)	40°	100%

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 5, proses counting botol dan perpindahan motor servo berlangsung secara sinkron sesuai dengan logika program yang telah dirancang. Ketika botol pertama hingga botol ketiga terdeteksi, nilai counter bertambah dari 1 sampai 3 dan motor servo tetap berada pada posisi 40° untuk mengarahkan botol ke jalur pertama. Setelah botol keempat terdeteksi sehingga nilai counter menjadi 4, motor servo berpindah ke posisi 85° untuk mengarahkan botol ke jalur kedua. Posisi tersebut dipertahankan hingga counter mencapai nilai 6. Setelah satu siklus selesai, sistem melakukan reset nilai counter menjadi 0 sehingga servo kembali ke posisi awal dan siap memulai proses berikutnya. Seluruh proses counting dan perpindahan servo berlangsung sesuai dengan logika yang telah diprogram sehingga diperoleh tingkat akurasi sebesar 100%. Berikut gambar tampilan HMI ketika sensor mendeteksi botol.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem konveyor packaging botol sampling berbasis PLC Siemens S7-1200 dengan monitoring HMI, dapat disimpulkan bahwa sistem telah berhasil dirancang dan bekerja sesuai dengan urutan proses yang ditentukan. Sensor photoelektrik mampu mendeteksi botol pada jarak 2 cm dengan tingkat keberhasilan 100%, sedangkan sensor proximity mampu mendeteksi botol pada jarak 2 mm dan memberikan perintah penghentian konveyor secara konsisten. Motor DC gearbox mampu beroperasi mendekati kecepatan acuan 32 RPM dengan hasil pengukuran rata-rata 31,8 RPM dan selisih 0,2 RPM atau tingkat kesalahan sekitar 0,62%. Pengujian beban juga menunjukkan bahwa peningkatan jumlah botol menyebabkan peningkatan arus dan daya motor akibat bertambahnya beban mekanis pada konveyor. Integrasi proses counting dengan pergerakan servo MG996R berhasil dilakukan, dengan posisi servo 40° untuk botol ke-1 hingga ke-3 dan 85° untuk botol ke-4 hingga ke-6. Hasil pengujian menunjukkan akurasi perpindahan jalur sebesar 100%. HMI juga mampu menampilkan nilai counting, kondisi sensor, dan kecepatan motor secara real-time, sehingga sistem dapat digunakan untuk proses monitoring dan pengendalian konveyor secara terintegrasi.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Arif, *SIMULASI PENGONTROLAN ELEVATOR 3 LANTAI DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER (PLC) SIEMENS S7-1200 1215 DC/DC/RLY*. 2020.

[2] S. Kusumastuti, S. Hadwi, and W. Sasono, “Plc-Based Packaging Using Hmi Omron Nb7W-Tw00B,” pp. 130–134, 2022.

[3] W. Raharjo, P. Studi, T. Industri, F. Teknik, and U. M. Surakarta, “Pembelajaran Mata Kuliah Otomasi Industri Program,” *Eprints UMS*, 2018.

[4] M. Huda, *Rancang bangun conveyor dan sistem peminjaman alat laboratorium berbasis*

website menggunakan arduino uno dengan radio frequency identification (rfid). 2022. [Online]. Available: http://eprints3.upgris.ac.id/id/eprint/2911/1/MIFTAKHUL HUDA 15650081.pdf

[5] D. H. Simanjuntak, "Sistim Monitoring Pada Sorting Machine dengan HMI Berbasis PLC," vol. 2, no. 1, 2021.

[6] G. Stalin and B. Francisco, "Integration of RS-485 serial Modbus communication systems between KINCO HMI and SIEMENS V20 drive.," 2025.

[7] K. J. Hughes *et al.*, "Review of Carbon Nanotube Research and Development: Materials and Emerging Applications," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 7, no. 16, pp. 18695–18713, 2024, doi: 10.1021/acsanm.4c02721.