



INTEGRASI PLC M241 DENGAN COLLABORATIVE ROBOT UR3 UNTUK WORKPIECE RANDOM PICKING

Tugas Akhir

**Oleh:
Riccy (4222211005)**

INTEGRASI PLC M241 DENGAN COLLABORATIVE ROBOT UR3 UNTUK WORKPIECE RANDOM PICKING

Article Info

Riwayat artikel

Diterima Desember 29, 2025

Direvisi Januari dd, 2026

Disetujui Januari dd, 2026

Kata kunci:

PLC

Robot kolaboratif

Random picking

Otomasi industri

Manufaktur fleksibel

ABSTRACT

Integrasi antara programmable logic controller (PLC) dan robot kolaboratif menjadi aspek krusial dalam otomasi industri modern untuk mencapai fleksibilitas dan efisiensi produksi, khususnya pada aplikasi *random picking*. Penelitian ini mengusulkan arsitektur kontrol terintegrasi antara PLC Schneider Modicon M241 dan robot kolaboratif Universal Robots UR3 untuk melakukan pengambilan benda kerja dengan posisi acak dan orientasi tetap (*random position, fixed orientation*). PLC berperan sebagai pengendali utama yang mengelola urutan operasi, logika keselamatan, dan sinkronisasi antar-perangkat, sementara sistem visi berbasis PC menyediakan data koordinat objek yang dikirimkan ke PLC melalui komunikasi Modbus TCP. Validasi eksperimental dilakukan melalui 30 siklus pengujian dengan distribusi posisi objek acak pada area kerja. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mencapai tingkat keberhasilan komunikasi sebesar 100%, dengan rata-rata latensi komunikasi dari sistem visi ke PLC sebesar 5–10 ms. Seluruh siklus pengambilan berhasil dieksekusi tanpa kegagalan sinkronisasi, dengan waktu siklus rata-rata sebesar 7,5 detik per objek. Dibandingkan pendekatan *fixed pick*, sistem yang diusulkan memberikan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi karena mampu menangani variasi posisi objek tanpa perubahan program robot, sehingga menghilangkan kebutuhan re-teaching posisi pick dan mengurangi waktu setup ulang sistem. Temuan ini menunjukkan bahwa arsitektur integrasi PLC–robot kolaboratif yang diusulkan bersifat andal, modular, dan sesuai untuk diterapkan pada sistem manufaktur fleksibel berskala kecil hingga menengah.

Penulis Utama:

Riccy

Department of Bioprocess Technology, Faculty of Biotechnology and Biomolecular Sciences

Politeknik Negeri Batam

29461 Batam , Kepulauan Riau , Indonesia

Email: riccyliu.11@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi Industry 4.0 menuntut sistem otomasi industri yang semakin adaptif, terintegrasi, dan mampu beroperasi secara kolaboratif antara mesin, sistem kontrol, dan manusia. Salah satu teknologi yang berkembang pesat dalam konteks ini adalah robot kolaboratif, yang dirancang untuk bekerja berdampingan dengan manusia secara aman serta memiliki fleksibilitas lebih tinggi dibandingkan robot industri konvensional [6], [7]. Industri manufaktur modern semakin banyak mengadopsi robot kolaboratif karena kemampuannya mendukung produksi fleksibel, mengurangi waktu *setup*, serta meningkatkan keselamatan kerja.

Dalam konteks manufaktur fleksibel, random picking merujuk pada proses pengambilan benda kerja dengan posisi yang tidak tetap di area kerja. Aplikasi ini umum dijumpai pada proses *bin-picking*, *kitting*, dan *material handling*, di mana penggunaan *mechanical fixture* tidak ekonomis. Kemampuan sistem untuk menangani variasi posisi objek secara otomatis menjadi faktor kunci dalam meningkatkan fleksibilitas produksi dan efisiensi operasional. Kemampuan random picking menjadi semakin penting dalam industri modern yang ditandai oleh variasi produk tinggi dan volume produksi menengah hingga kecil, di mana penggunaan fixture khusus meningkatkan biaya investasi dan waktu setup sistem.

Di sisi lain, Programmable Logic Controller (PLC) tetap menjadi tulang punggung sistem otomasi industri karena keandalan operasinya, determinisme waktu nyata, serta kompatibilitasnya dengan berbagai protokol komunikasi industri standar. Integrasi PLC dengan robot kolaboratif memungkinkan pembagian peran yang jelas, di mana PLC berfungsi sebagai pengendali utama untuk logika urutan, keselamatan, dan manajemen sistem, sementara robot bertanggung jawab pada eksekusi gerakan mekanis yang kompleks [2], [3].

Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi PLC dan robot industri melalui protokol komunikasi berbasis Ethernet, seperti Modbus TCP/IP, mampu meningkatkan efisiensi, fleksibilitas, dan interoperabilitas sistem otomasi [2], [4], [9]. Selain itu, Sejumlah penelitian melaporkan bahwa integrasi sistem visi dengan PLC meningkatkan kemampuan adaptasi sistem terhadap variasi posisi dan kondisi objek kerja [1], [8]. Pendekatan ini memungkinkan pemisahan fungsi persepsi dan kendali, sehingga sistem menjadi lebih modular dan mudah dikembangkan.

Namun demikian, kajian ilmiah yang secara spesifik membahas arsitektur integrasi PLC–Robot Kolaboratif–sistem visi–HMI dalam konteks random picking masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian lebih berfokus pada optimasi algoritma visi atau perencanaan lintasan robot, sementara aspek desain arsitektur integrasi, sinkronisasi antar-perangkat, serta peran PLC sebagai pengendali terpusat belum banyak dibahas secara mendalam, khususnya pada implementasi menggunakan PLC Schneider Modicon M241 dan robot Universal Robots UR3.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi arsitektur integrasi antar-perangkat pada sistem *Robot Manufacturing System* (RMS), dengan fokus pada komunikasi dan sinkronisasi antara PLC M241, robot kolaboratif UR3, sistem visi berbasis PC, dan Human Machine Interface (HMI). Penelitian ini menitikberatkan pada mekanisme pertukaran data, peran *client-server*, serta implementasi logika kontrol berbasis Finite State Machine (FSM) pada PLC, sebagaimana direkomendasikan dalam praktik otomasi industri modern [1], [5], [9].

Pada penelitian ini, istilah random picking dibatasi pada kondisi posisi objek yang acak dengan orientasi tetap, serta satu objek diproses pada setiap siklus operasi (*one object per cycle*). Pembatasan ini diterapkan untuk memfokuskan evaluasi pada aspek integrasi sistem, keandalan komunikasi, dan konsistensi logika kontrol, bukan pada optimasi algoritma visi atau perencanaan lintasan robot.

Kontribusi utama dari penelitian ini terletak pada perancangan dan evaluasi arsitektur integrasi terpusat berbasis PLC Schneider Modicon M241 yang mengoordinasikan sistem visi, Robot UR3, dan HMI melalui komunikasi Modbus TCP. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada algoritma visi atau perencanaan lintasan robot secara terpisah, penelitian ini, sepanjang pengetahuan penulis, merupakan salah satu studi awal yang menitikberatkan sinkronisasi multi-client, desain logika kontrol berbasis FSM pada PLC, serta evaluasi performa komunikasi dalam skenario random picking berbasis robot kolaboratif.

Struktur artikel ini disusun sebagai berikut: Bagian II menjelaskan metodologi penelitian yang mencakup arsitektur sistem, komunikasi antar-perangkat, dan desain logika kontrol. Bagian III menyajikan hasil pengujian dan pembahasan kinerja sistem. Bagian IV memuat kesimpulan serta arah pengembangan penelitian selanjutnya.

2. METODE PENELITIAN

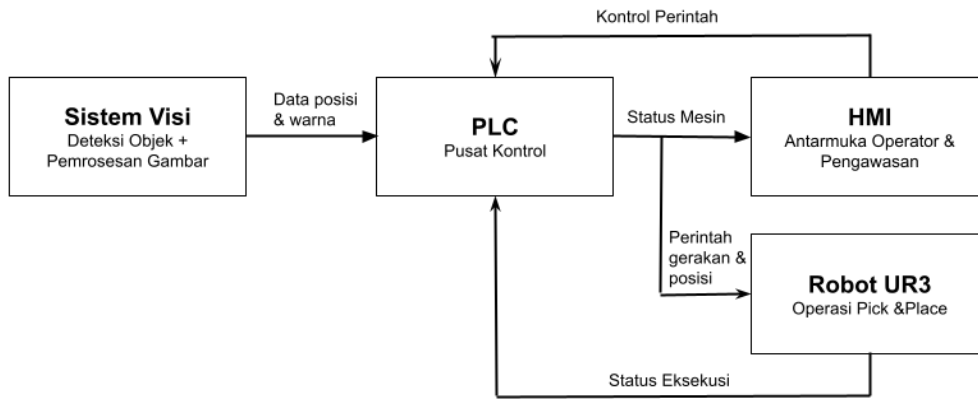
2.1. Arsitektur Sistem Terintegrasi

Penelitian ini mengembangkan sebuah sistem otomasi yang merupakan bagian dari *Robot Manufacturing System* (RMS) dengan arsitektur kendali terpusat berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC). Sistem mengintegrasikan beberapa perangkat otomasi industri yang bekerja secara terkoordinasi dalam satu alur operasi terstruktur. Komponen utama sistem terdiri atas:

- (1) PLC Schneider Modicon M241,
- (2) Robot UR3 sebagai aktuator eksekusi,
- (3) Sistem visi berbasis kamera dan PC pemroses, serta
- (4) *Human Machine Interface* (HMI) sebagai antarmuka operator.

Penelitian ini menempatkan PLC Schneider Modicon M241 sebagai pengendali utama sistem yang bertanggung jawab atas pengaturan urutan kerja, sinkronisasi antar-perangkat, serta implementasi logika keselamatan. Seluruh keputusan kontrol tingkat sistem—termasuk pemberian izin gerak Robot UR3, pengiriman perintah eksekusi, dan pengelolaan status operasi—dilakukan secara terpusat di PLC. Pemilihan pendekatan ini untuk menjamin determinisme waktu, keandalan sistem, serta kesesuaian dengan praktik otomasi industri yang telah dilaporkan pada penelitian terdahulu [1], [3].

PLC yang digunakan mendukung komunikasi Ethernet berbasis Modbus TCP/IP, sehingga memungkinkan integrasi yang fleksibel dengan perangkat eksternal seperti sistem visi dan HMI. Arsitektur hubungan antar-komponen sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan aliran data dan peran masing-masing perangkat dalam sistem terintegrasi.



Gambar 1. Diagram blok sistem

Implementasi fisik dari arsitektur tersebut direalisasikan melalui pengaturan perangkat keras sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2, yang memperlihatkan koneksi aktual antara PLC, Robot UR3, kamera sistem visi, dan HMI dalam lingkungan eksperimen



Gambar 2. Pengaturan *hardware* (PLC, Robot, Kamera, dan HMI)

Spesifikasi teknis PLC yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 1, yang menunjukkan kemampuan PLC dalam mendukung kebutuhan pemrosesan logika, komunikasi Ethernet, serta sinkronisasi data antar-perangkat.

Tabel 1. Spesifikasi PLC Schneider Modicon M241

Parameter	Spesifikasi
Model	Schneider Modicon M241 – TM241CE40R
Digital Input	24
Digital Output	16

Kapasitas Memori	64 MB RAM
Ethernet Port	1 × Ethernet (10/100 Mbps)
Protokol Komunikasi	Modbus TCP/IP, Modbus RTU
Cycle Time	10 ms 16 EtherNet/IP, 64 ms 64 Modbus TCP
Fungsi dalam Sistem	Pengendali utama, logika FSM, sinkronisasi data antar perangkat

Robot UR3 berperan sebagai aktuator eksekusi yang menjalankan pergerakan pick-and-place berdasarkan perintah dan data posisi yang diterima dari PLC [2]. Robot tidak menerima data langsung dari sistem visi; seluruh koordinasi dilakukan melalui PLC. Dengan demikian, PLC berfungsi sebagai pusat penghubung antara sistem persepsi dan sistem aktuasi, sesuai dengan arsitektur integrasi PLC–vision yang direkomendasikan pada penelitian terdahulu [1], [8]. Spesifikasi teknis Robot UR3 yang digunakan dalam sistem ini disajikan pada Tabel 2, yang menunjukkan kemampuan robot dalam mendukung operasi kolaboratif dan akurasi gerakan pada aplikasi pick-and-place.

Tabel 2. Spesifikasi Robot Kolaboratif Universal Robots UR3

Parameter	Spesifikasi
Model	Universal Robots UR3 (CB3.1)
Jumlah Sumbu	6 DOF
Payload Maksimum	3 Kg
Jangkauan Kerja	±500 mm
Interface Komunikasi	Ethernet
Protokol Komunikasi	Modbus TCP/IP
Fungsi dalam Sistem	Eksekusi gerakan pick-and-place berdasarkan perintah PLC

HMI digunakan sebagai antarmuka operator untuk pemantauan status sistem secara real-time, pengaturan parameter operasi, serta pemberian perintah dasar seperti start, stop, dan reset. Komunikasi antara HMI dan PLC dilakukan melalui Modbus TCP/IP, sehingga operator dapat memantau status internal PLC dan Robot UR3 secara terintegrasi. Spesifikasi HMI yang digunakan dalam penelitian ini dirangkum pada Tabel 3, sedangkan tampilan antarmuka HMI selama sistem beroperasi ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 3. Spesifikasi HMI Schneider Electric

Parameter	Spesifikasi
Model	Schneider HMIET6400
Ukuran Laar	7 Inchi TFT LCD
Resolusi	800 × 480 piksel
Interface Komunikasi	Ethernet
Protokol Komunikasi	Modbus TCP/IP
Input Pengguna	Layar Sentuh
Fungsi dalam Sistem	Antarmuka operator, monitoring status sistem, kontrol manual



Gambar 3. Antarmuka HMI dalam operasi

Sebagai tambahan, sistem dilengkapi dengan fitur keselamatan dasar, meliputi tombol *emergency stop*, pembatasan area kerja robot, serta logika *interlock* pada PLC yang mencegah pergerakan robot ketika kondisi sistem tidak valid. Mekanisme ini dirancang untuk memastikan operasi sistem yang aman dan andal selama proses random picking.

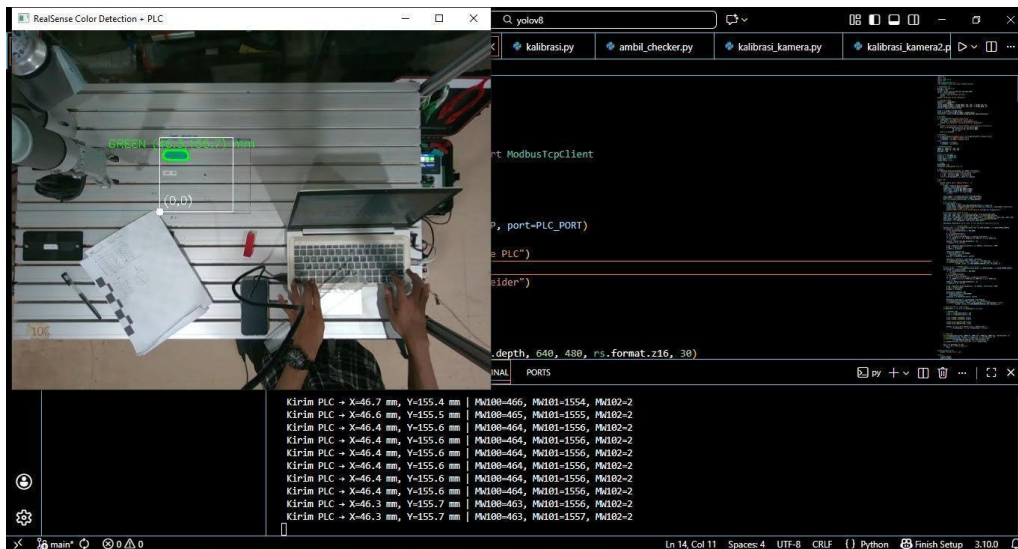
2.2. Sistem Visi dan Algoritma Deteksi Objek

Sistem visi dikonfigurasi sebagai modul independen yang terdiri atas kamera dan PC pemroses. Kamera menangkap citra area kerja dan mengirimkannya ke PC untuk diproses, sementara hasil pemrosesan berupa data koordinat objek dikirimkan ke PLC melalui jaringan Ethernet menggunakan Modbus TCP/IP. Kamera yang digunakan adalah Intel RealSense D455, dengan spesifikasi teknis sebagaimana dirangkum pada Tabel 4. Meskipun kamera ini mampu menghasilkan data kedalaman, pada penelitian ini hanya citra RGB yang digunakan untuk proses deteksi objek.

Tabel 4. Spesifikasi Kamera Intel RealSense D455

Parameter	Spesifikasi
Model	Intel RealSense D455
Tipe Sensor	Stereo Depth Camera
Resolusi Depth	Hingga 1280×720
Frame Rate	Hingga 90 fps
Interface	USB 3.1
Jangkauan Operasi	0.6m-6m
Output Data	Citra RGB dan data kedalaman
Waktu Pemrosesan	< 50ms
Fungsi Dalam Sistem	Akuisisi citra dan ekstraksi koordinat objek untuk random picking

Deteksi objek dilakukan menggunakan metode segmentasi berbasis warna (*color-based segmentation*) pada citra RGB untuk memisahkan objek dari latar belakang. Setelah proses segmentasi, koordinat pusat objek dihitung menggunakan metode *centroid* dan dikonversi ke sistem koordinat kerja robot. Pendekatan ini dipilih karena kesederhanaan implementasi dan kecepatan pemrosesan yang memadai untuk kebutuhan integrasi sistem, tanpa berfokus pada optimasi algoritma visi tingkat lanjut. Hasil keluaran sistem visi berupa citra hasil segmentasi dan penentuan koordinat objek ditunjukkan pada Gambar 4, yang menjadi dasar pengambilan keputusan logika oleh PLC.



Gambar 4. Output dari sistem visi

2.3. Arsitektur Jaringan dan Komunikasi

Seluruh perangkat dalam sistem dihubungkan melalui jaringan Ethernet industri menggunakan topologi star, dengan PLC sebagai pusat komunikasi. Untuk mendukung konektivitas antar-perangkat, digunakan sebuah unmanaged Ethernet hub tipe XPTN-9000-45-5TX, dengan spesifikasi teknis yang dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi Ethernet hub

Parameter	Spesifikasi
Model	XPTN-9000-45-5TX
Jumlah Port	5 × RJ45
Kecepatan Port	10/100 Mbps (Auto-negotiation)
Standar Ethernet	EEE 802.3, IEEE 802.3u
Media Transmisi	Twisted Pair (Cat5e atau lebih tinggi)
Mode Operasi	Half/Full Duplex
Fungsi dalam Sistem	Penghubung jaringan Ethernet antar PLC, robot UR3, PC visi, dan HMI

Media transmisi yang digunakan adalah Yuntai Ethernet Patch Cable Cat5e 4PR-ETL, yang memenuhi standar TIA-568B. Spesifikasi kabel Ethernet yang digunakan ditampilkan pada Tabel 6.

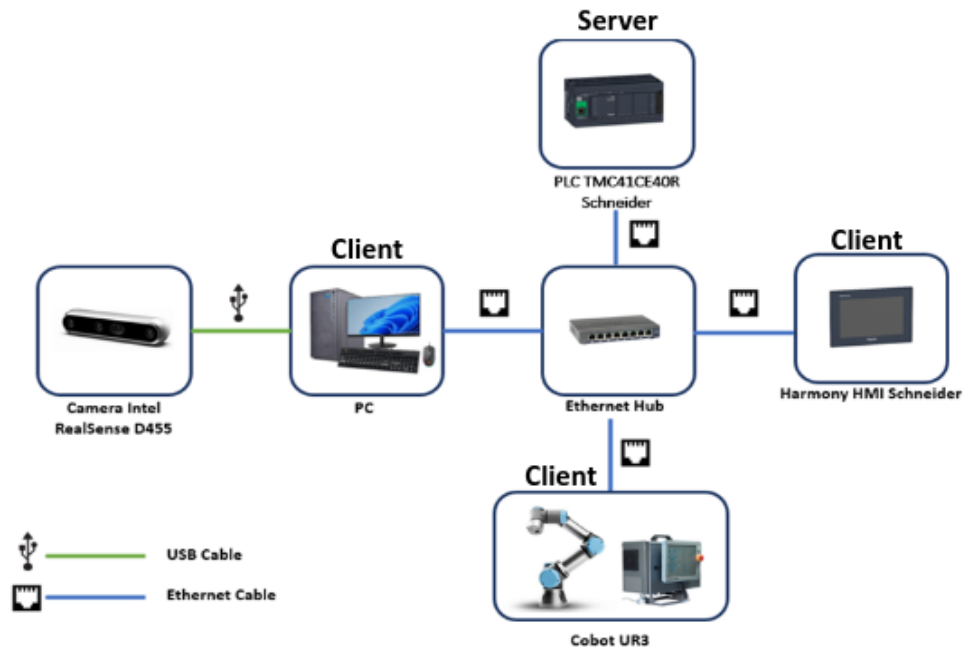
Tabel 6. Spesifikasi kabel Ethernet

Parameter	Spesifikasi
Produk	Yuntai Ethernet Patch Cable
Kategori Kabel	Car5e
Struktur Konduktor	4 Pair (4PR) Twisted Pair
Tipe Kabel	Patch Cable
Standar Kabel	Twisted Pair (Cat5e atau lebih tinggi)
Impedansi	100 Ω
Kecepatan Data	Hingga 100 Mbps
Jenis Konektor	RJ45

Konfigurasi jaringan ini dipilih karena mampu mendukung komunikasi deterministik dengan beban data rendah serta sesuai untuk aplikasi otomasi industri skala kecil hingga menengah.

2.4. Penentuan Peran Client dan Server

Pada lapisan komunikasi, penelitian ini mengkonfigurasi PLC Schneider Modicon M241 sebagai Modbus TCP server, sementara PC sistem visi, Robot UR3, dan HMI berperan sebagai Modbus TCP client. PLC menyediakan area memori berupa *coil register* dan *holding register* yang digunakan sebagai media pertukaran data antar-perangkat. Setiap client melakukan operasi baca dan tulis data sesuai dengan kebutuhan fungsionalnya. Pendekatan *multi-client single-server* ini mempermudah integrasi perangkat heterogen serta menjaga struktur kendali sistem tetap terpusat dan deterministik. Konsep hubungan client–server ini ditunjukkan secara konseptual pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram client & server

Konfigurasi alamat IP, protokol komunikasi, dan peran masing-masing perangkat dalam sistem dirangkum secara rinci pada Tabel 7.

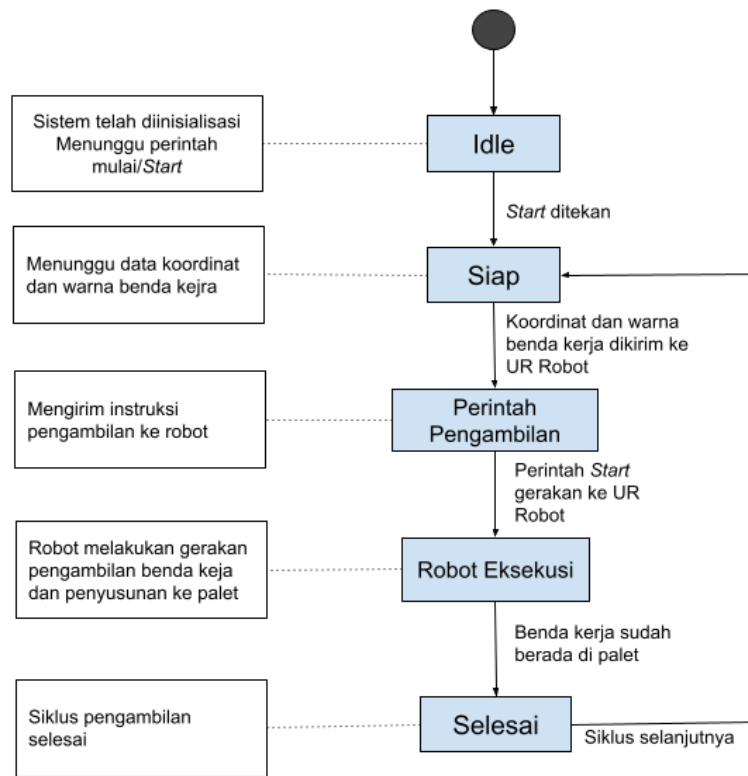
Tabel 7. Konfigurasi perangkat dan peran dalam sistem terintegrasi

Perangkat	Antarmuka	Protokol	Alamat IP	Peran	Mode
PLC M241	Ethernet	Modbus TCP	192.168.1.12	Server	Master Controller
PC (Vision)	Ethernet	Modbus TCP	192.168.1.09	Client	Data Sender
UR3	Ethernet	Modbus TCP	192.168.1.13	Client	Motion Executor
HMI	Ethernet	Modbus TCP	192.168.1.10	Client	Operator Interface
Kamera	USB	-	-	Sensor	Akuisisi Data Visual

2.5. Desain Logika Kontrol Berbasis Finite State Machine

2.5.1. Konsep Finite State Machine dalam Sistem PLC

Untuk mengelola kompleksitas interaksi antar-perangkat, logika kontrol utama sistem dirancang menggunakan pendekatan Finite State Machine (FSM). Diagram FSM yang menggambarkan state dan transisi sistem ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram FSM

FSM terdiri atas state Idle, Siap, Perintah Pengambilan, Robot Eksekusi, dan Selesai. Setiap transisi antar state dipicu oleh kondisi logika, status komunikasi, serta sinyal umpan balik dari Robot UR3 dan sistem visi.

2.5.2. Implementasi FSM ke Ladder Logic PLC

FSM yang dirancang secara konseptual kemudian dikonversi ke dalam ladder logic pada PLC Modicon M241. Setiap state direpresentasikan menggunakan bit internal atau memory flag PLC, sedangkan transisi antar state diimplementasikan menggunakan kombinasi kontak logika, komparator, dan timer. Pendekatan FSM-to-ladder ini dipilih karena:

- (1) Memudahkan pembacaan dan debugging program PLC.
- (2) Memisahkan logika urutan (*sequence control*) dari logika komunikasi.
- (3) Memungkinkan ekspansi state tanpa mengubah struktur program secara signifikan.

Meskipun terdapat metode lain dalam penyusunan program PLC, seperti *sequential function chart* (SFC) atau structured text (ST), ladder logic berbasis FSM dipilih karena kompatibilitas luas, kemudahan pemeliharaan, dan kesesuaian dengan standar industri yang umum digunakan.

2.6. Prosedur Inisialisasi Sistem

Penelitian ini merancang prosedur inisialisasi sistem untuk memastikan seluruh perangkat berada dalam kondisi siap sebelum siklus operasi dimulai. Urutan inisialisasi sistem adalah sebagai berikut:

- (1) PC dinyalakan dan memastikan terkoneksi dengan kamera.
- (2) PLC dinyalakan sebagai pengendali utama sistem.
- (3) PLC melakukan pengecekan konektivitas terhadap robot UR3, PC sistem visi, dan HMI melalui komunikasi Modbus TCP/IP.
- (4) Robot UR3 di *start program* dan akan masuk ke kondisi *ready state*.
- (5) PLC menginisialisasi variabel internal dan FSM ke state *Idle*.
- (6) HMI menampilkan status sistem siap dan menunggu tombol *start* dari operator untuk memulai siklus kerja.

2.7. Definisi dan Pembatasan Random Picking

Pada penelitian ini, istilah *random picking* dibatasi pada kondisi di mana posisi objek bervariasi secara acak di area kerja, sementara orientasi objek dijaga tetap. Variasi posisi objek dihasilkan melalui penempatan objek secara manual pada lokasi yang berbeda sebelum setiap siklus pengujian. Sistem tidak menggunakan algoritma pembangkitan posisi acak secara numerik, melainkan mengandalkan variasi posisi aktual yang terdeteksi oleh sistem visi. Selain itu, setiap siklus operasi hanya memproses satu objek (*one object per cycle*). Pembatasan ini diterapkan untuk memfokuskan evaluasi pada keandalan integrasi sistem, komunikasi antar-perangkat, dan sinkronisasi logika kontrol, bukan pada optimasi algoritma visi atau perencanaan lintasan robot.

2.8. Fitur Keselamatan Sistem

Sistem dilengkapi dengan fitur keselamatan dasar yang meliputi tombol *emergency stop*, pembatasan area kerja robot, serta logika *interlock* pada PLC. PLC secara kontinu memonitor kondisi keselamatan sistem, dan setiap pelanggaran kondisi aman akan menyebabkan penghentian siklus FSM dan menonaktifkan perintah gerak robot. Fitur keselamatan bawaan pada robot UR3, seperti deteksi tabrakan dan pembatasan gaya, turut mendukung operasi sistem yang aman dan andal.

2.9. Prosedur Pengujian Integrasi Sistem

Pengujian difokuskan pada keberhasilan integrasi dan komunikasi antar-perangkat, bukan pada optimasi performa picking. Setiap siklus operasi dirancang untuk memproses satu objek pada satu waktu, guna menghindari kompleksitas interaksi multi-objek dan memastikan konsistensi evaluasi integrasi. Pengujian meliputi:

- (1) Verifikasi koneksi Modbus TCP antar perangkat.
- (2) Validasi pengiriman dan penerimaan data koordinat dari PC ke PLC.
- (3) Validasi penerusan perintah dari PLC ke robot UR3.
- (4) Evaluasi respon sistem terhadap kondisi normal dan kondisi kesalahan komunikasi.

Parameter yang diamati mencakup keberhasilan pertukaran data, konsistensi status sistem, serta respon sistem terhadap perubahan state.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Keandalan Integrasi dan Komunikasi Sistem

Hasil pengujian menunjukkan bahwa arsitektur komunikasi berbasis Modbus TCP dengan PLC sebagai server pusat mampu mendukung pertukaran data antar-perangkat secara stabil dan deterministik. Seluruh perangkat, termasuk sistem visi, HMI, dan Robot UR3, berhasil berkomunikasi dengan PLC tanpa terjadinya kehilangan paket data selama pengujian. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya yang melaporkan keandalan Modbus TCP dalam integrasi sistem otomasi industri berbasis PLC [5], [9]

Implementasi Finite State Machine (FSM) pada PLC terbukti efektif dalam mencegah terjadinya transisi state yang tidak valid akibat keterlambatan komunikasi atau perubahan status yang tidak terduga. Setiap perintah dari HMI maupun sistem visi hanya diproses ketika sistem berada pada state yang sesuai. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa FSM meningkatkan keandalan kontrol sekuensial pada sistem industri kompleks [10].

Tabel 8 menunjukkan hasil pengujian penerimaan data posisi objek dari sistem visi ke PLC. Seluruh data koordinat yang terdeteksi dinyatakan valid dan berhasil diterima oleh PLC dengan waktu penerimaan rata-rata di bawah 20 ms, yang masih berada dalam batas toleransi sistem kendali real-time.

Tabel 8. Hasil pengujian penerimaan data posisi objek dari sistem visi ke PLC

Percobaan	X (mm)	Y (mm)	Status Deteksi	Data Diterima PLC	Waktu Terima (ms)
1	80	74	Valid	Ya	16
2	108	102	Valid	Ya	17
3	120	110	Valid	Ya	16
4	160	110	Valid	Ya	18
5	170	88	Valid	Ya	20

Selanjutnya, Tabel 9 memperlihatkan hasil pengujian pengiriman perintah dari HMI ke PLC. Perubahan status memori PLC menunjukkan bahwa setiap aksi operator, baik dalam mode otomatis maupun manual, diterjemahkan dengan benar ke dalam variabel kontrol PLC.

Tabel 9. Hasil pengujian pengiriman perintah dari HMI ke PLC

Aksi HMI	Status Memori PLC di Awal	Status Memori PLC di Akhir
Start	0	1
Stop	0	1
Pause	0	1
Auto	0	1
Manual	0	1
X Manual Coordinate (123)	0	123
Y Manual Coordinate (123)	0	123

Sementara itu, Tabel 10 menunjukkan hasil pengujian pengiriman perintah dari PLC ke Robot UR3. Robot hanya mengeksekusi pergerakan ketika kombinasi coil dan command berada pada kondisi valid. Hal ini menunjukkan bahwa logika interlock yang diterapkan pada PLC berfungsi dengan baik dalam mencegah pergerakan robot yang tidak diinginkan.

Tabel 10. Hasil pengujian pengiriman perintah dari PLC ke UR3

Percobaan	Status Coil/Command dari PLC			Respon Robot UR3		
	UR Start	Benda Kerja Merah	Benda Kerja Hijau	Robot UR3 Ke Pickup Station	Robot UR3 Memindahkan Benda Kerja Ke Palet	
					Merah	Hijau
1	0	0	0	Tidak	Tidak	Tidak
2	1	0	0	Ya	Tidak	Tidak
3	1	1	0	Ya	Ya	Tidak
4	1	0	1	Ya	Tidak	Ya
5	0	1	0	Tidak	Tidak	Tidak
6	0	0	1	Tidak	Tidak	Tidak

3.2. Analisis Arsitektur Client–Server dan Latensi Komunikasi

Sistem yang dikembangkan menerapkan model multi-client single-server, di mana PLC berperan sebagai server pusat dan perangkat lain bertindak sebagai client. Model ini memungkinkan setiap perangkat menjalankan fungsi spesifik tanpa ketergantungan langsung antar-client, sehingga meningkatkan modularitas dan kemudahan pemeliharaan sistem.

Keunggulan utama pendekatan ini adalah kemudahan dalam proses debugging, karena seluruh data komunikasi dapat dimonitor melalui register dan coil PLC. Selain itu, pendekatan ini sejalan dengan praktik industri dalam integrasi sistem otomasi berbasis PLC [4], [5].

Untuk mengevaluasi performa komunikasi secara lebih rinci, dilakukan pengukuran latensi komunikasi untuk setiap jenis pesan dan perangkat. Pengukuran latensi komunikasi dilakukan selama 30 siklus operasi untuk setiap jenis pesan. Hasil pengukuran ini dirangkum dalam Tabel 11, yang menunjukkan bahwa latensi komunikasi berada pada kisaran yang relatif kecil dan konsisten.

Tabel 11. Communication latency per perangkat dan jenis pesan

Perangkat	Jenis Pesan	Rata-rata latensi (ms)	Minimum (ms)	Maksimum (ms)
Sistem Visi → PLC	Data koordinat objek (X,Y)	7	5	9
HMI → PLC	Perintah kontrol (Start/Stop/Mode)	12	10	15
PLC → Robot UR3	Perintah eksekusi gerakan	15	12	18
PLC → HMI	Status sistem	10	7	13
Robot UR3 → PLC	Status Eksekusi	16	14	18

3.3. Kinerja Sistem Secara Keseluruhan

Evaluasi performa sistem dilakukan dengan mengukur success rate, cycle time, dan throughput selama pengujian berulang. Pengujian dilakukan dengan siklus 30 kali percobaan untuk setiap skenario operasi, guna memastikan validitas statistik hasil.

Ringkasan performa sistem disajikan pada Tabel 12, yang memberikan gambaran umum mengenai kemampuan sistem dalam menjalankan proses pick-and-place secara berulang dan konsisten.

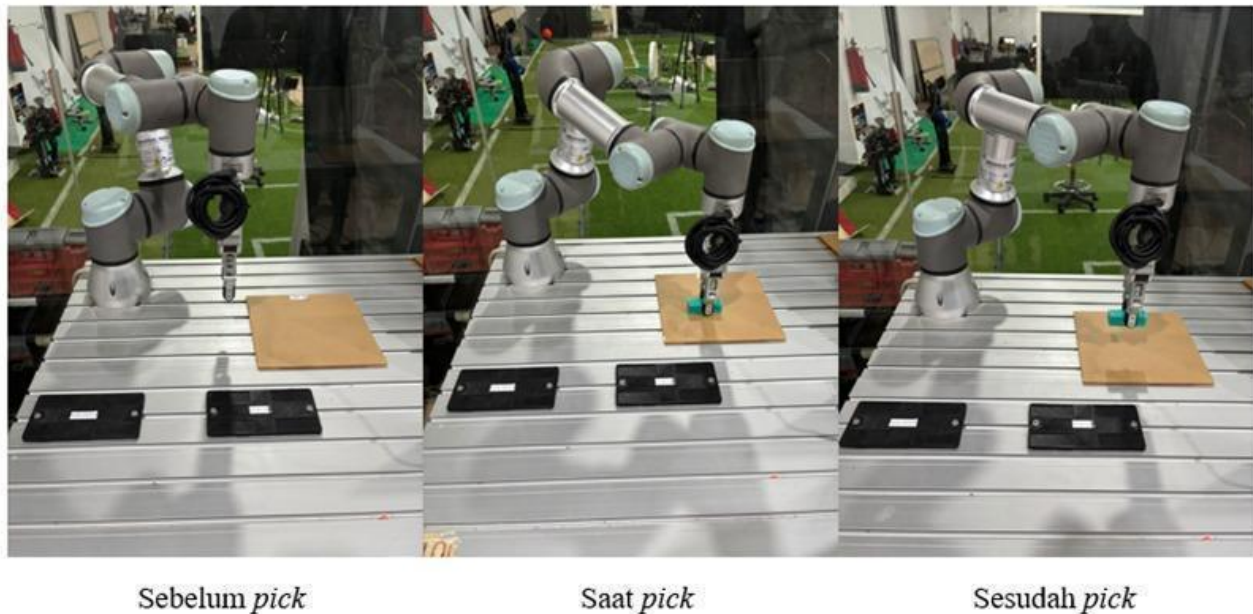
Tabel 12. Overall system performance (success rate, cycle time, throughput)

Parameter	Nilai
Jumlah Percobaan	30
Successful Picks	30
Failed Picks	0
Success Rate	30
Rata-rata Cycle Time	7,5

Cycle Time Minimum	7,2
Cycle Time Maksimum	7,8
Throughput	±8 objek/menit

Untuk menganalisis kestabilan waktu siklus, dilakukan pencatatan cycle time pada setiap percobaan. Distribusi waktu siklus tersebut divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan variasi performa sistem.

Dokumentasi visual dari operasi sistem, termasuk kondisi sukses dan kegagalan, disajikan dalam bentuk foto berurutan (timeframe photos) pada Gambar 7.



Gambar 7. Timeframe foto operasi sistem dan keberhasilan pick-and-place

3.4. Analisa Kegagalan

Selama pengujian, beberapa kondisi kegagalan teridentifikasi, antara lain:

- (1) Kegagalan deteksi objek akibat pencahayaan yang tidak merata pada area kerja.
- (2) Data posisi tidak valid ketika objek tidak sepenuhnya berada di dalam area yang ditentukan.
- (3) Delay komunikasi sesaat akibat beban jaringan Ethernet.

Untuk mengatasi kegagalan tersebut, diterapkan beberapa strategi mitigasi, seperti validasi data koordinat pada PLC, penggunaan FSM untuk mencegah eksekusi perintah yang tidak valid, serta pengaturan ulang kondisi pencahayaan. Pendekatan ini terbukti mampu mengurangi dampak kegagalan terhadap keseluruhan sistem.

3.5. Diskusi dan Keterbatasan Sistem

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemusatan kontrol pada PLC dengan arsitektur client-server yang terdefinisi jelas mampu meningkatkan keteraturan dan keandalan integrasi sistem Robot Manufacturing System (RMS). Dibandingkan pendekatan desentralisasi, arsitektur ini mempermudah sinkronisasi antar-perangkat dan meminimalkan konflik perintah.

Namun demikian, sistem masih memiliki beberapa keterbatasan. Bottleneck utama terletak pada waktu pemrosesan sistem visi dan kecepatan mekanik Robot UR3, yang secara langsung membatasi throughput maksimum sistem. Selain itu, penelitian ini masih dibatasi pada skenario satu objek per siklus, sehingga pengujian pada skenario multi-objek dan beban produksi yang lebih tinggi menjadi peluang pengembangan selanjutnya. Secara keseluruhan, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pendekatan integrasi berbasis PLC dengan FSM merupakan solusi yang andal dan aplikatif untuk sistem manufaktur terintegrasi berskala kecil hingga menengah.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi antara PLC Schneider Modicon M241 dan Robot UR3 dapat diimplementasikan secara andal dan konsisten dalam sebuah sistem Robot Manufacturing System (RMS) terintegrasi. Arsitektur komunikasi berbasis Modbus TCP dengan kontrol terpusat pada PLC mampu mengkoordinasikan sistem visi, HMI, dan Robot UR3 secara sinkron sesuai dengan urutan operasi yang telah ditentukan.

Berdasarkan hasil pengujian sebanyak 30 siklus operasi, sistem menunjukkan success rate sebesar 100% dalam skenario *one object per cycle* dengan rata-rata cycle time sebesar 7,5 detik per objek, sistem mencapai throughput sekitar 8 objek per menit, tanpa terjadi kegagalan eksekusi gerakan robot maupun kehilangan data komunikasi. Rata-rata latency komunikasi PLC-Robot UR3 yang diukur menggunakan timestamp berbasis PLC berada pada kisaran 12–18 ms, dengan variasi yang relatif kecil antar siklus. Nilai latency ini masih berada jauh di bawah batas toleransi sistem kontrol diskrit berbasis PLC, sehingga dapat dikategorikan tidak signifikan (tidak adanya kondisi *timeout*, *missed command*, maupun kesalahan transisi state selama siklus operasi berlangsung) terhadap performa operasional sistem.

Implementasi logika kontrol berbasis Finite State Machine (FSM) pada PLC terbukti efektif dalam mengelola urutan operasi yang melibatkan banyak perangkat heterogen. Pendekatan ini memungkinkan pemisahan yang jelas antara proses akuisisi data, pengambilan keputusan logika, dan eksekusi gerakan robot, sehingga meningkatkan keterbacaan program, kemudahan debugging, serta stabilitas sistem. Selain itu, pendekatan ini memberikan fleksibilitas yang lebih baik dibandingkan kontrol berbasis urutan linier, karena penambahan state atau modifikasi alur kerja dapat dilakukan tanpa mengubah struktur utama program PLC secara signifikan.

Dari sisi implikasi praktis, arsitektur sistem yang diusulkan bersifat relatif sederhana dan cost-effective, karena hanya memanfaatkan PLC, Robot UR3, sistem visi berbasis PC, serta perangkat jaringan Ethernet standar tanpa memerlukan controller robot tambahan atau middleware khusus. Hal ini menjadikan pendekatan ini relevan untuk diterapkan pada industri manufaktur skala kecil hingga menengah (SME) yang membutuhkan fleksibilitas otomasi dengan biaya investasi yang terkendali.

Meskipun penelitian ini dibatasi pada skenario satu objek per siklus dengan orientasi objek tetap, arsitektur integrasi yang dirancang bersifat modular dan dapat ditingkatkan. Secara konseptual, sistem ini dapat diperluas untuk menangani jumlah objek yang lebih banyak, peningkatan throughput, maupun integrasi lebih dari satu robot, dengan menyesuaikan kapasitas jaringan, pemetaan register Modbus, serta desain FSM pada PLC.

Sebagai arah pengembangan selanjutnya, penelitian ini dapat diperluas dengan

- (1) Implementasi *multi-object picking* dalam satu siklus operasi,
- (2) Integrasi algoritma visi yang lebih adaptif terhadap variasi orientasi objek,
- (3) Evaluasi performa sistem pada beban komunikasi yang lebih tinggi atau pada konfigurasi multi-robot, serta
- (4) Analisis jitter komunikasi dan determinisme waktu secara lebih mendalam untuk aplikasi industri berskala lebih besar.

Dibandingkan dengan pendekatan otomasi konvensional berbasis *fixed pick*, sistem yang diusulkan menawarkan fleksibilitas yang lebih baik dalam menangani variasi kondisi kerja, khususnya melalui pemisahan fungsi antara sistem visi, pengendali logika, dan aktuator robot. Berbeda dengan pendekatan *fixed pick* yang memerlukan penyesuaian ulang program robot ketika posisi objek berubah, sistem yang diusulkan mampu menangani variasi posisi objek dalam seluruh area kerja tanpa modifikasi program robot, sehingga menghilangkan waktu reprogramming pada setiap perubahan layout. Meskipun penelitian ini difokuskan pada skenario pengambilan satu objek dalam setiap siklus operasi, arsitektur integrasi yang dirancang bersifat modular dan dapat diperluas.

Pengembangan lanjutan disarankan untuk mencakup integrasi sistem visi tiga dimensi, mekanisme pertukaran data yang lebih kompleks, serta strategi perencanaan lintasan adaptif, sehingga sistem dapat mendukung skenario pengambilan multi-objek dan diterapkan pada lingkungan manufaktur dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh rekan satu tim proyek atas kerja sama, kontribusi teknis, dan diskusi konstruktif selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada Bapak Eko Rudiawan, selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, dan masukan akademik yang sangat berharga sejak tahap perencanaan hingga penyusunan manuskrip ini.

Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Politeknik Negeri Batam atas dukungan fasilitas laboratorium, lingkungan akademik, serta sarana dan prasarana yang memungkinkan penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik. Dukungan dari berbagai pihak tersebut berperan penting dalam keberhasilan penelitian dan penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. S. Wijaya, A. Pratama, R. A. Fatekha, H. Soebhakti, and S. Prayoga, "A Visual-Based Pick and Place on 6 DoF Robot Manipulator," *Journal of Applied Electrical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 44–50, Jun. 2024.
- [2] M. Maślanka, D. Jancarczyk, and J. Rysiński, "Integration of Machine Vision and PLC-Based Control for Scalable Quality Inspection in Industry 4.0," *Sensors*, vol. 25, no. 20, 2025, doi: 10.3390/s25208321.
- [3] E. Tapia, L. Sastoke-Pinilla, U. Lopez-Novoa, I. Bediaga, and N. López de Lacalle, "Assessing Industrial Communication Protocols to Bridge the Gap between Machine Tools and Software Monitoring," *Sensors*, vol. 23, no. 12, 2023, doi: 10.3390/s23125694.
- [4] N. O. Nwazor and E. E. Audu, "Data Communications Network for Real-Time Industrial Control Systems," *Nigerian Journal of Technological Development*, vol. 19, no. 1, pp. 48–59, 2022, doi: 10.4314/njtd.v19i1.6.
- [5] B. Joshi, "A Study of the Various Communication Protocols Used in PLC Systems: Modbus, Profibus, Ethernet/IP and Their Implementations," *International Research Journal of Modern Engineering Technology and Science*, no. 4, pp. 3535–3542, 2024, doi: 10.56726/irjmet52882.
- [6] J. Y. Seong, R. Ranjan, J. Kye, S. Lee, and S. Lee, "Enhancing Industrial Communication with Ethernet/IP: A Study of Real-Time Cooperative Robot Communication," *Sensors*, vol. 23, no. 20, 2023, doi: 10.3390/s23208580.
- [7] A. S. P. Ananda, I. M. I. Munadhif, I. R. Isa, R. Y. A. Ryan, and R. I. Rini, "Integrasi Sistem Komunikasi Modbus TCP/IP pada PLC Siemens S7-1200, ESP32, dan HMI," *Jurnal Elektronik dan Otomasi Industri*, vol. 10, no. 2, pp. 234–244, 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i2.3254.
- [8] Universal Robots A/S, "UR3 User Manual and Technical Specifications," Odense, Denmark, 2023–2024.
- [9] J. Mellado and F. Núñez, "Design of an IoT-PLC: A Containerized PLC for Industry 4.0 Automation," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 25, p. 100250, 2022, doi: 10.1016/j.jii.2021.100250.
- [10] V. D. Cong, "Design and Development of a Cost-Efficiency Robot Arm with a PLC-Based Robot Controller," *FME Transactions*, vol. 52, no. 2, pp. 226–236, 2024, doi: 10.5937/fme2402226C.
- [11] S. Öztürk and F. Kuncan, "Linear Delta Robot Controlled with PLC Based on Image Processing," *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 150–158, 2022, doi: 10.34088/kjose.1058559.
- [12] A. Marosan, M. Crenganis, C. E. Girjob, and M. Burghilea, "Integrated Safety Architecture for Collaborative Robotics Using a UR3 Robot and PLC," *Acta Universitatis Cibiniensis Technical Series*, vol. 77, no. 1, pp. 72–77, 2025, doi: 10.2478/aucts-2025-0010.
- [13] M. Maqsood, A. Khalid, M. A. Khan, and S. Khan, "PLC-based robotic automation systems: Architecture, communication, and control strategies—A review," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 118742–118760, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3312457.
- [14] Schneider Electric, "Modicon M241 Logic Controller Programming Guide," Rueil-Malmaison, France, 2023.
- [15] A. Author et al., "The Role of PLC in Automation, Industry and Education Purpose: A Review," *Pakistan Journal of Engineering Technology & Science*, vol. 11, no. 2, pp. 22–31, Dec. 2023, doi: 10.22555/pjets.v11i1.975.

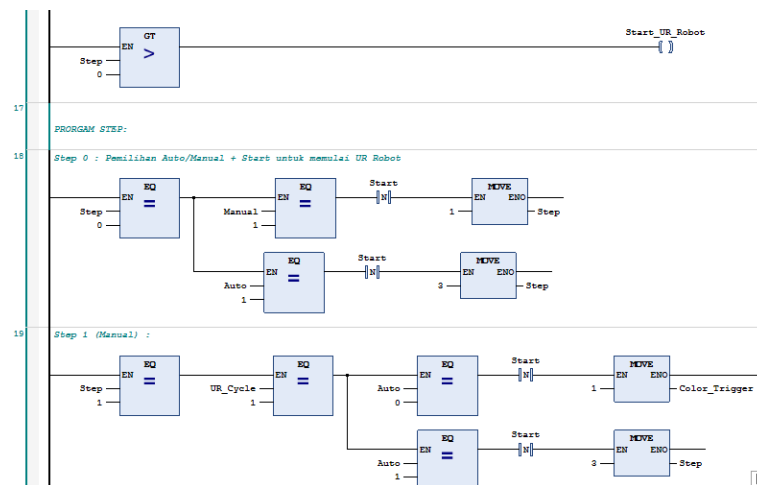
BIOGRAFI PENULIS

	Riccy is an undergraduate student in the Robotics Engineering (D4) program at Politeknik Negeri Batam, Indonesia. He is currently in his final year of study and actively involved in applied research related to industrial automation and robotic systems. His academic interests focus on PLC-based control systems, collaborative robotics, machine vision integration, and industrial communication protocols, particularly Modbus TCP/IP for real-time automation. He can be contacted at: riccyliu.11@gmail.com
	Eko Rudiawan Jamzuri received a B.A.Sc. in Electrical Engineering from Bandung Institute of Technology in 2013 and earned an M.Sc. in Electrical Engineering from National Taiwan Normal University in 2020. Currently, he is a Lecturer at the Department of Electrical Engineering at Politeknik Negeri Batam. His research interests include humanoid robotics, computer vision, machine learning, and deep learning. He can be contacted at email: ekorudiawan@polibatam.ac.id.

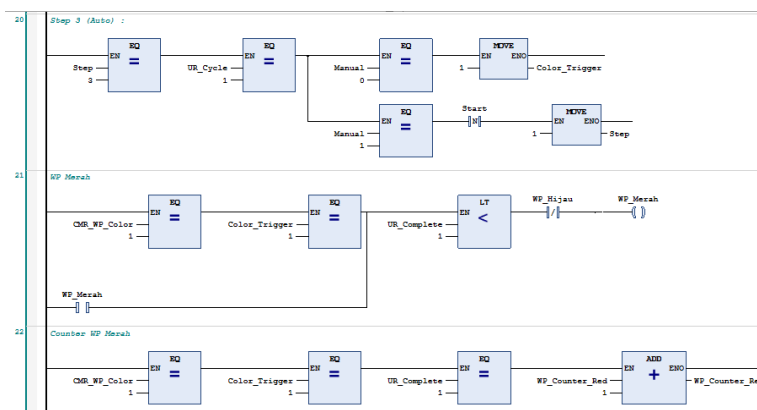
LAMPIRAN

Tabel Mapping register modbus TCP antar perangkat

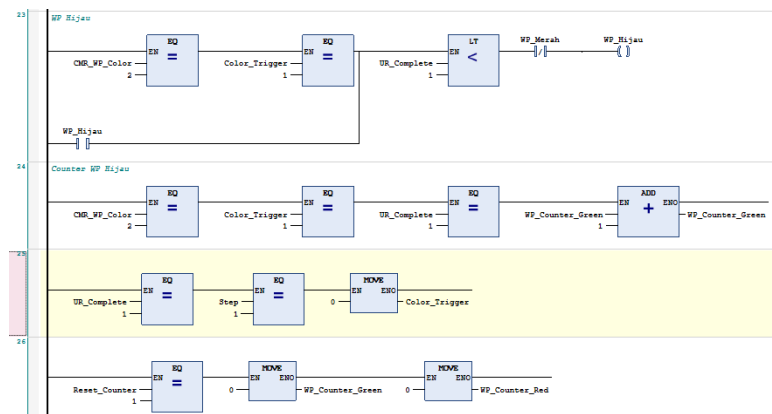
Alamat Register	Tipe Register	Tipe Data	Sumber	Tujuan	Deskripsi
%QX0.1	Coil Register	Boolean	PLC	UR3	Trigger <i>Start</i> Pada UR3
%QX0.2	Coil Register	Boolean	PLC	UR3	Indikator Benda Kerja Hijau
%QX0.3	Coil Register	Boolean	PLC	UR3	Indikator Benda Kerja Merah
%MW0	Memory Register	Integer	HMI	PLC	Tombol <i>Start</i> di HMI
%MW1	Memory Register	Integer	HMI	PLC	Tombol <i>Pause</i> di HMI
%MW2	Memory Register	Integer	HMI	PLC	Tombol <i>Stop</i> di HMI
%MW3	Memory Register	Integer	HMI	PLC	Tombol <i>Auto</i> di HMI
%MW4	Memory Register	Integer	HMI	PLC	Tombol <i>Manual</i> di HMI
%MW10	Memory Register	Integer	Camera	HMI	Status Camera
%MW100	Memory Register	Integer	Camera	HMI	Koordinat X Axis
%MW101	Memory Register	Integer	Camera	HMI	Koordinat Y Axis
%MW102	Memory Register	Integer	Camera	PLC	Warna Benda Kerja
%MW202	Memory Register	Integer	UR3	PLC	Selesai 1 Cycle (<i>Complete</i>)



Gambar Program ladder PLC untuk state idle dan siap



Gambar Program ladder PLC untuk state perintah pengambilan dan robot eksekusi pada benda kerja merah



Gambar Program ladder PLC untuk state perintah pengambilan dan robot eksekusi pada benda kerja hijau