Blend Sains
Jurnal Teknik
https://jurnal.ilmubersama.com/index.php/blendsains

Artikel Penelitian

Strategi Switching Mode Pengecatan Berbasis YOLO v11 pada Turntable Servo Robot Arm dengan PLC Mitsubishi FX3U

Mario Leo Nardo [1], Soraya Norma Mustika [1], Achmad Hamdan [1], Moh Cholid Rosyidi [2]*

[1] *Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia*
[2] *Departemen Engineering, PT Wira Griya, Jakarta Barat, Indonesia*

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 30 September 2026
Revisi Akhir: 29 Oktober 2026
Diterbitkan *Online*: 29 Oktober 2026

KATA KUNCI

Logic Controller
Mode Switching
Robot Painting
Servo Turntable
YOLO v11

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 858-1218-9159
E-mail: mario.leo.2309356@students.um.ac.id

A B S T R A K

Proses pengecatan robotik konvensional umumnya menggunakan metode *teaching–playback* dengan parameter statis, sehingga setiap pergantian jenis objek memerlukan penyesuaian ulang secara manual yang memakan waktu dan rentan kesalahan. Penelitian ini mengusulkan strategi *memory-based switching* mode pengecatan, di mana hasil klasifikasi objek berbasis YOLOv11 digunakan sebagai kunci (*key*) untuk memanggil parameter gerak turntable servo yang tersimpan pada memori PLC Mitsubishi FX3U, bukan untuk mengendalikan aktuator secara langsung. Kode identitas objek dikirim melalui komunikasi serial ke register D100, kemudian PLC membangkitkan sinyal *pulse–direction* ke driver servo FL20 dan mengirim sinyal ready ke robot arm setelah posisi target tercapai. Pengujian dilakukan sebanyak 10 siklus pada masing-masing dari dua mode, yaitu Mode 1 (0°) dan Mode 2 (90°). Hasil menunjukkan bahwa model klasifikasi mencapai *confidence score* 0,97 pada Mode 1 dan 0,98 pada Mode 2. Rata-rata waktu respon sistem sebesar 1,21 s dan 1,29 s, rata-rata error posisi sebesar 0,31° dan 0,40°, dengan tingkat keberhasilan switching 100% pada kedua mode. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi klasifikasi visual dan kontrol PLC berbasis memori layak diterapkan sebagai alternatif metode *teaching–playback* pada lini pengecatan dengan variasi objek.

PENDAHULUAN

Transformasi menuju industri 4.0 menuntut sistem manufaktur mampu menangani variasi produk yang tinggi tanpa mengorbankan kualitas dan efisiensi. Salah satu proses yang paling terdampak adalah pengecatan. Pengecatan manual menghasilkan kualitas yang tidak seragam dan memaparkan operator pada bahan kimia, sedangkan pengecatan robotik konvensional diprogram melalui metode *teaching–playback* dengan parameter statis. Akibatnya, setiap pergantian jenis produk mengharuskan penyesuaian ulang secara manual, yang menyebabkan waktu henti dan meningkatkan risiko kesalahan.

Berbagai pendekatan telah diusulkan untuk mengurangi ketergantungan pada pemrograman manual. Survei terhadap pembangkitan lintasan *offline* otomatis untuk aplikasi penyemprotan menunjukkan bahwa persiapan proses pengecatan robotik masih sangat memakan waktu dan bergantung pada keahlian *programmer*, sementara sebagian besar penelitian baru menyelesaikan aspek parsial dari otomatisasi tersebut [1]. Pendekatan berbasis *deep learning* pada *point cloud* 3D mampu memprediksi lintasan semprot dengan cakupan cat hingga 95% pada objek baru [2]. Namun, pendekatan ini membutuhkan sensor 3D, komputasi yang berat, dan integrasi yang kompleks, sehingga sulit diterapkan pada industri kecil-menengah yang menggunakan PLC kelas *compact*. Di sisi lain, integrasi deteksi objek berbasis YOLO dengan PLC sudah terbukti dalam aplikasi industri. YOLOv5s yang digabungkan dengan PLC Siemens S7-1200 pada sistem *stacking* robotik mencapai akurasi operasional 100% pada 9.600 kemasan[3]. Sistem sortir berbasis YOLOv5 dan PLC Outseal mencapai akurasi rata-rata 88,26%, dengan performa yang dipengaruhi kondisi pencahayaan[4] . PLC

https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2090 Attribution-ShareAlike 4.0 International Some rights reserved

juga telah digunakan sebagai pemicu *skill* robot [5]. Namun, penelitian-penelitian tersebut berfokus pada *stacking* dan *sorting*, bukan pada pemilihan parameter proses pengecatan.

Dari kajian tersebut terlihat sebuah celah. Pendekatan pengecatan adaptif yang ada cenderung membangkitkan lintasan secara penuh dengan biaya tinggi, sedangkan integrasi *vision*–PLC yang sudah matang belum banyak dimanfaatkan sebagai mekanisme *switching* mode pada sel pengecatan berbasis turntable servo. Masih belum banyak kajian tentang pendekatan ringan yang memanfaatkan hasil klasifikasi visual sebagai kunci untuk memanggil parameter gerak yang telah tervalidasi di memori PLC. Padahal, pendekatan ini lebih mudah diterapkan pada infrastruktur PLC yang sudah ada.

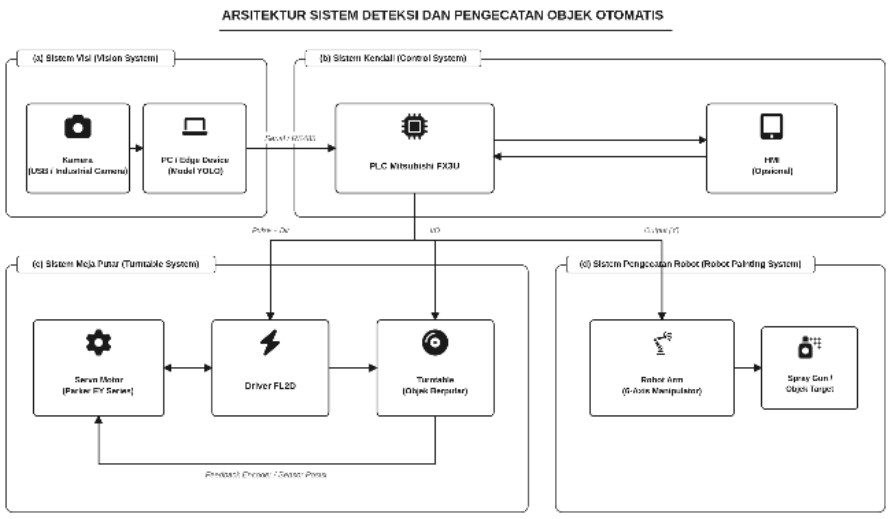
Penelitian ini mengusulkan strategi *memory-based switching* mode pengecatan yang mengintegrasikan klasifikasi objek berbasis YOLOv11 dengan PLC Mitsubishi FX3U dan turntable servo. Kontribusi penelitian ini meliputiarsitektur yang memisahkan pengambilan keputusan visual dari kendali aktuator, di mana hasil klasifikasi hanya berperan sebagai *key* untuk memanggil parameter gerak (sudut, kecepatan, dan jumlah putaran) yang tersimpan di register PLC; implementasi sinkronisasi posisi turntable menggunakan sinyal *pulse–direction* dan konfirmasi posisi sebelum sinyal *ready* dikirim ke robot arm; dan evaluasi kuantitatif terhadap waktu respon, error posisi, dan tingkat keberhasilan *switching* pada dua mode operasi.

METODOLOGI

Metode penelitian pada studi ini disusun untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pengecatan otomatis yang adaptif berbasis klasifikasi objek dengan integrasi sistem kontrol industri. Pendekatan yang digunakan menggabungkan teknologi computer vision untuk identifikasi objek secara real-time dengan sistem kontrol berbasis PLC sebagai pengambil keputusan utama dalam menentukan parameter gerakan.Penelitian ini diawali dengan perancangan arsitektur sistem yang mencakup sistem vision, sistem kontrol, sistem aktuator turntable, dan sistem robot pengecatan. Selanjutnya dilakukan pengembangan algoritma klasifikasi objek menggunakan metode YOLO v11 untuk menghasilkan identitas objek yang akan digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Hasil klasifikasi tersebut kemudian dikirimkan ke PLC untuk memanggil parameter gerakan yang telah disimpan dalam memori, seperti kecepatan putar, sudut rotasi, dan jumlah putaran.

Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem yang diusulkan (Gambar 1) terdiri atas empat subsistem, yaitu sistem *vision*, sistem kontrol, sistem aktuator turntable, dan sistem robot pengecatan. Ciri utama arsitektur ini adalah penggunaan hasil klasifikasi objek sebagai *key* untuk memanggil parameter gerak yang tersimpan di memori PLC, bukan untuk mengendalikan aktuator secara langsung [6]. Ciri utama arsitektur ini adalah penggunaan hasil klasifikasi objek sebagai key untuk memanggil parameter gerak yang tersimpan di memori PLC, bukan mengontrol aktuator secara langsung. Dengan demikian, sistem memiliki sifat adaptif terhadap variasi objek tanpa intervensi manual

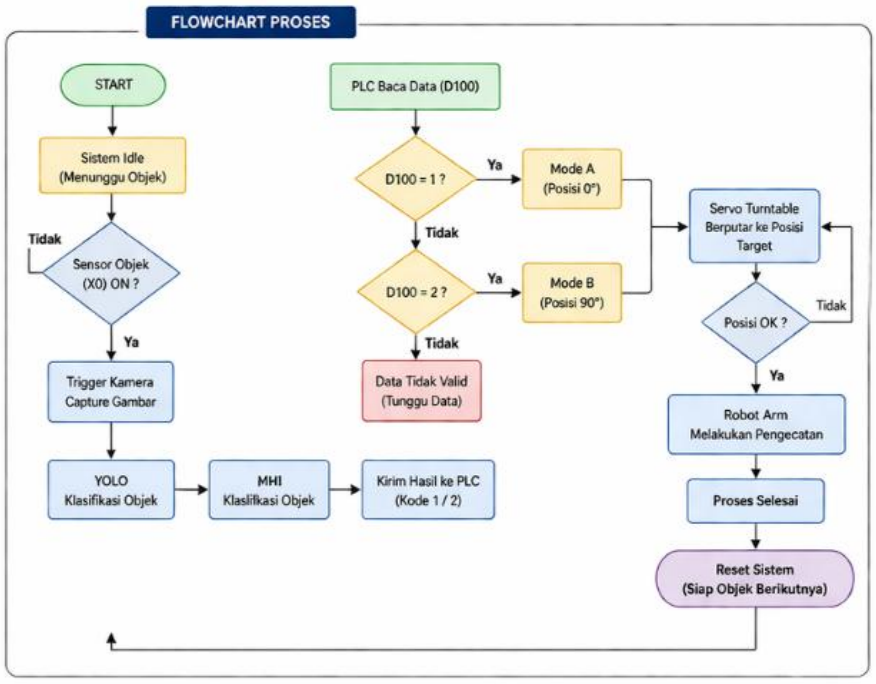


Gambar 1. Arsitektur Sistem

Gambar arsitektur sistem menunjukkan integrasi antara sistem vision, sistem kontrol berbasis PLC, sistem aktuator turntable, dan sistem robot arm dalam satu sistem pengecatan otomatis. Setiap bagian memiliki fungsi spesifik yang saling terhubung untuk menghasilkan proses yang sinkron dan adaptif terhadap jenis objek yang diproses.Arsitektur sistem yang diusulkan merupakan integrasi antara sistem klasifikasi objek berbasis computer vision dan sistem kontrol industri berbasis PLC untuk mendukung proses pengecatan otomatis yang adaptif dan tersinkronisasi. Sistem ini terdiri dari empat subsistem utama, yaitu sistem vision, sistem kontrol, sistem aktuator turntable, dan sistem robot pengecatan.Sistem vision terdiri dari kamera dan perangkat komputasi (PC/edge) yang digunakan untuk melakukan akuisisi dan pengolahan citra objek. Kamera berfungsi untuk menangkap gambar objek yang terdeteksi, kemudian citra tersebut diproses menggunakan algoritma YOLO untuk menghasilkan klasifikasi objek. Hasil klasifikasi dikonversi menjadi kode identitas (object ID) yang dikirimkan ke sistem kontrol melalui komunikasi serial (RS232/RS485).

Sistem kontrol menggunakan Mitsubishi FX3U PLC sebagai pusat pengambilan keputusan. PLC menerima kode identitas objek dan menggunakannya sebagai parameter untuk memanggil data yang telah tersimpan dalam memori internal Data tersebut berupa parameter gerakan turntable yang meliputi kecepatan putar (RPM), sudut rotasi, dan jumlah putaran. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk melakukan pengambilan keputusan secara adaptif melalui mekanisme memory-based switching.Sistem aktuator turntable terdiri dari servo motor dan driver motor (FL20) yang dikendalikan oleh PLC menggunakan sinyal pulse dan direction. Berdasarkan parameter yang telah dipanggil dari memori, servo motor akan memutar turntable untuk memposisikan objek sesuai kebutuhan proses pengecatan. Sistem ini juga dilengkapi dengan umpan balik berupa encoder atau sensor posisi untuk memastikan bahwa posisi target telah tercapai.Sistem robot pengecatan berfungsi sebagai pelaksana proses penyemprotan cat. Setelah posisi turntable sesuai, PLC akan mengaktifkan robot arm melalui sinyal output digital. Dengan demikian, Sistem robot pengecatan menerima sinyal *ready* dari PLC setelah posisi turntable terkonfirmasi, sehingga penyemprotan dilakukan pada posisi objek yang sesuai [7].

FlowChart Proses



Gambar 2.Chart Proses

Flowchart proses menggambarkan alur kerja sistem pengecatan otomatis berbasis klasifikasi objek yang dimulai dari kondisi awal hingga sistem siap untuk objek berikutnya.Proses diawali pada kondisi start, di mana sistem berada dan menunggu keberadaan objek. Pada tahap ini dilakukan pengecekan terhadap sensor objek (X0). Jika sensor belum aktif, maka sistem tetap berada dalam kondisi menunggu.Ketika sensor mendeteksi objek (X0 ON), sistem akan mengaktifkan kamera untuk melakukan capture gambar. Citra yang diperoleh kemudian diproses menggunakan algoritma YOLO untuk melakukan klasifikasi objek. Hasil klasifikasi ini selanjutnya ditampilkan pada antarmuka (HMI) dan dikirim ke PLC dalam bentuk kode identitas objek, misalnya kode 1 atau 2.PLC kemudian membaca data tersebut pada register (misalnya D100) dan melakukan proses pengambilan keputusan. Jika nilai D100 sama dengan 1, maka sistem masuk ke Mode A, di mana turntable akan diposisikan pada sudut tertentu (misalnya 0°). Jika nilai D100 sama dengan 2, maka sistem masuk

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2090

ke Mode B, dengan posisi turntable yang berbeda (misalnya 90°). Apabila data yang diterima tidak sesuai atau belum valid, maka sistem akan menunggu hingga data yang benar diterima.Setelah mode ditentukan, PLC mengirimkan sinyal kontrol berupa pulse dan direction ke driver servo untuk menggerakkan turntable menuju posisi target. Selama proses ini, sistem melakukan pengecekan apakah posisi telah tercapai melalui kondisi posisi OK. Jika posisi belum sesuai, maka proses pergerakan akan terus dilanjutkank.Setelah posisi turntable sesuai dengan parameter yang ditentukan, PLC akan mengaktifkan robot arm untuk melakukan proses pengecatan. Proses ini berlangsung hingga selesai sesuai dengan mode yang dipilih.Setelah proses pengecatan selesai, sistem akan melakukan reset, sehingga kembali ke kondisi awal (idle) dan siap untuk memproses objek berikutnya.[8]

Pembangkitan Pulse Kendali servo (PWM)

Posisi turntable dikendalikan menggunakan sinyal pulse train dengan skema pulse–direction yang dibangkitkan oleh output kecepatan tinggi PLC Mitsubishi FX3U ke driver servo FL20 yang dioperasikan pada position mode. Jumlah pulsa untuk mencapai sudut target dihitung dengan:

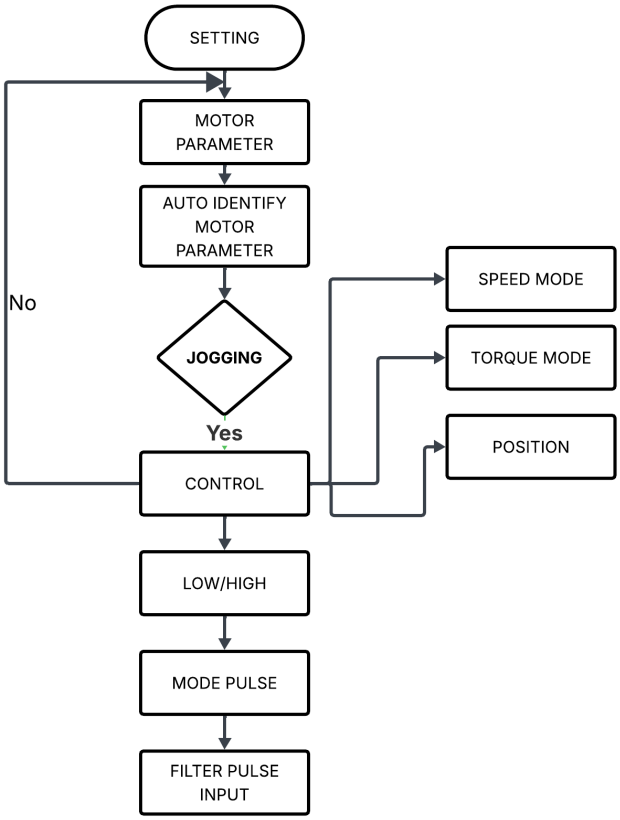
$$P = (\theta / 360°) \times (PPR \times i_g) / EG \quad \ldots(1)$$

dengan P adalah jumlah pulsa, θ sudut target, PPR resolusi encoder (pulsa/putaran), i_g rasio gearbox mekanik, dan EG rasio electronic gear pada driver. Kecepatan putar turntable ditentukan oleh frekuensi pulsa:

$$f = (n / 60) \times (PPR \times i_g) / EG \quad \ldots(2)$$

Dengan f frekuensi pulsa (Hz) dan n kecepatan turntable (RPM). Akurasi posisi dievaluasi menggunakan error absolut:

$$e = |\theta_target - \theta_aktual| \quad \ldots(3)$$



Gambar 3.Pulse Width Modulation

KonGambarasi driver servo FL20 (Gambar 3) diawali dengan memasukkan parameter teknis motor, kemudian dilakukan *auto-identify motor parameter* agar driver mengenali konstanta internal motor sehingga respon menjadi stabil. Fungsi motor divalidasi melalui *jogging*. Jika motor tidak merespon dengan benar, parameter diatur ulang. Setelah validasi

berhasil, driver diatur pada *position mode*, level logika dan format pulsa disesuaikan dengan output PLC, serta filter *pulse input* diaktifkan untuk meredam derau elektromagnetik.

Implementasi Algoritma YOLO V11

Modul *vision* menggunakan YOLO11, generasi detektor objek *real-time* dari Ultralytics yang dirilis pada 2024 [9][10]. Dibandingkan YOLOv8, YOLO11 memperkenalkan blok C3k2 pada *backbone* dan modul atensi C2PSA yang meningkatkan ekstraksi fitur, sehingga menghasilkan akurasi lebih tinggi dengan jumlah parameter lebih sedikit. Karakteristik ini sesuai untuk sistem yang membutuhkan inferensi cepat sebagai pemicu *switching* mode. Model dilatih menggunakan dataset citra benda kerja yang dianotasi ke dalam dua kelas, yaitu Mode 1 dan Mode 2. Hasil inferensi berupa kelas dengan *confidence score* tertinggi dikonversi menjadi nilai integer (1 atau 2) dan dikirim ke register D100.

Protokol Pengujian Sistem

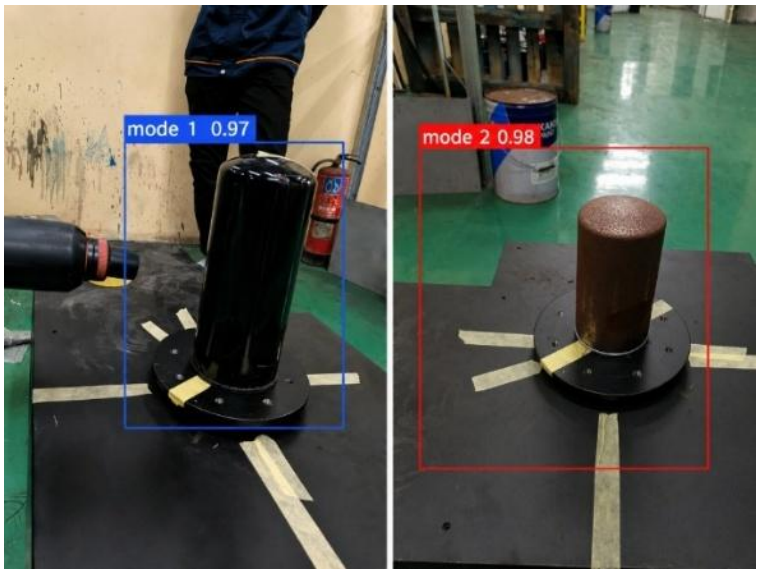
Tahap akhir metodologi adalah pengujian sistem untuk memastikan seluruh fungsi berjalan sesuai rancangan, mulai dari klasifikasi objek hingga konfirmasi posisi turntable. Setiap mode diuji sebanyak 10 siklus dengan prosedur yang sama: objek diletakkan pada turntable, sensor X0 memicu proses klasifikasi, PLC menjalankan mode sesuai kode pada register D100, dan sistem kembali ke kondisi *idle* setelah sinyal *ready* dikirim. Parameter yang diukur meliputi:

1. *Confidence score* klasifikasi YOLOV11 untuk setiap kelas objek.
2. Waktu respon, yaitu selang waktu sejak sensor X0 aktif hingga sinyal posisi OK diterima PLC.
3. Error posisi turntable, dihitung menggunakan persamaan (3).
4. Tingkat keberhasilan *switching*, yaitu persentase siklus di mana mode yang dijalankan sesuai dengan kelas objek.

Data dikumpulkan melalui observasi langsung dan pencatatan nilai pada monitor PLC, kemudian disajikan dalam bentuk rata-rata ± standar deviasi. Pengujian ini merupakan validasi fungsional terbatas; pengujian keandalan dengan jumlah siklus yang lebih besar dan variasi objek yang lebih kompleks menjadi bagian dari penelitian lanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Algoritma YOLO v11



Gambar 4.Pengujian sistem algoritma YOLO V11

Gambar 4 menunjukkan hasil klasifikasi YOLO11 pada dua jenis benda kerja. Model mengenali objek Mode 1 dengan *confidence score* 0,97 dan objek Mode 2 dengan *confidence score* 0,98. Nilai yang tinggi pada kedua kelas menunjukkan bahwa fitur visual kedua objek, yaitu bentuk dan warna permukaan, cukup berbeda sehingga model dapat membedakannya dengan jelas. Perlu dicatat bahwa *confidence score* menggambarkan tingkat keyakinan model pada satu prediksi, bukan akurasi klasifikasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, keandalan modul *vision* dalam sistem ini dinilai melalui tingkat keberhasilan *switching* pada seluruh siklus pengujian

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2090

Pengujian Akurasi pendeteksian object

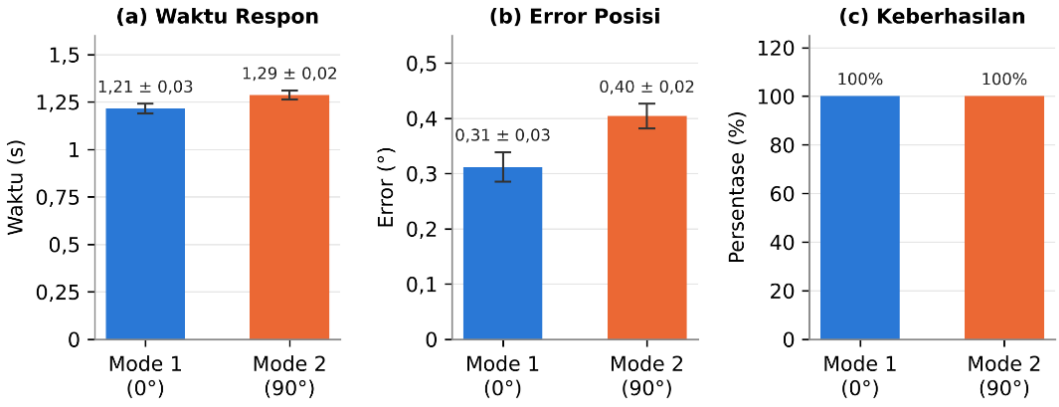
Tabel 1. Hasil Pengujian Sistem (n = 10 per mode)

Parameter	Mode 1 (0°)	Mode 2 (90°)
Waktu respon (s)	1,21 ± 0,03	1,29 ± 0,02
Rentang waktu respon (s)	1,18 – 1,25	1,25 – 1,32
Error posisi (°)	0,31 ± 0,03	0,40 ± 0,02
Rentang error posisi (°)	0,27 – 0,35	0,37 – 0,44
Keberhasilan switching	10/10 (100%)	10/10 (100%)

Keterangan: nilai disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi.

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 1, sistem berhasil melakukan proses switching mode dan sinkronisasi posisi turntable secara stabil pada dua kondisi pengujian, yaitu Mode 1 (posisi 0°) dan Mode 2 (posisi 90°). Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan untuk masing-masing mode guna mengetahui performa sistem berdasarkan parameter waktu respon dan error posisi.Pada Mode 1, sistem menghasilkan rata-rata waktu respon sebesar 1,21 detik dengan rata-rata error posisi sebesar 0,31°. Sementara itu, pada Mode 2 diperoleh rata-rata waktu respon sebesar 1,29 detik dengan rata-rata error posisi sebesar 0,41°. Seluruh percobaan menunjukkan tingkat keberhasilan sebesar 100%, yang menandakan bahwa sistem mampu menjalankan proses klasifikasi objek, pengiriman data ke PLC, serta pengendalian servo turntable tanpa kegagalan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar sudut perpindahan posisi turntable, maka waktu respon dan error posisi cenderung meningkat. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya jumlah pulsa (pulse) yang dikirimkan PLC ke servo motor untuk mencapai posisi target. Meskipun demikian, nilai error yang dihasilkan masih tergolong kecil sehingga sinkronisasi antara robot arm dan turntable tetap dapat berjalan dengan baik.Selain itu, kestabilan waktu respon pada setiap percobaan menunjukkan bahwa integrasi antara algoritma YOLO, PLC Mitsubishi FX3U, dan servo motor mampu bekerja secara konsisten dalam kondisi operasi berulang. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan memiliki performa yang cukup baik untuk diterapkan pada proses pengecatan otomatis berbasis klasifikasi objek secara real-time.



Gambar 1.Analisa Akurasi

Tabel 1 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa sistem berhasil menjalankan mode yang sesuai dengan kelas objek pada seluruh siklus pengujian, yaitu 10 siklus untuk masing-masing mode. Waktu respon Mode 2 lebih lama 0,08 s dibandingkan Mode 1, dan error posisinya lebih besar 0,09°. Uji-t Welch menunjukkan bahwa kedua perbedaan tersebut signifikan secara statistik ($p < 0,001$). Artinya, besar sudut perpindahan turntable berpengaruh nyata terhadap waktu dan akurasi posisi. Meskipun signifikan secara statistik, besarnya perbedaan tetap kecil secara praktis. Koefisien variasi waktu respon kurang dari 2,2% dan error posisi kurang dari 9% pada kedua mode, yang menunjukkan bahwa sistem bekerja konsisten pada siklus berulang. Interval kepercayaan 95% untuk rata-rata waktu respon dan error posisi berada dalam rentang ±0,02. Namun, tingkat keberhasilan 100% pada 10 siklus per mode secara statistik hanya menjamin batas bawah keberhasilan sekitar 69% pada tingkat kepercayaan 95%, sehingga pengujian dengan jumlah siklus yang lebih besar tetap diperlukan untuk memvalidasi keandalan sistem.

$$P = \theta \times \left(\frac{PPR \times i}{360^\circ}\right) \times \left(\frac{CMX}{CMV}\right) \qquad (4)$$

Keterangan variabel:

P = Jumlah total pulsa yang dibangkitkan oleh output kecepatan tinggi PLC (pulsa).

θ = Target sudut rotasi turntable (misalnya 0° untuk Mode 1 atau 90° untuk Mode 2).
PPR = *Pulses Per Revolution* bawaan encoder motor servo (misal: 10.000 pulsa/putaran).
i = Rasio perbandingan gigi mekanik (*gear ratio/gearbox*).
$\frac{CMX}{CMV}$ = Rasio roda gigi elektronik (*Electronic Gear Ratio*) pada driver servo FL20.

Persamaan Kecepatan Rotasi dan Frekuensi Pulsa (f)

Hubungan antara kecepatan putar target turntable N (dalam RPM) dengan frekuensi sinyal *Pulse Width Modulation* / *Pulse Train* (f) yang dibangkitkan PLC disolusikan melalui:

$$f = \frac{N \times PPR \times i}{60} \times \left(\frac{CMX}{CMV}\right) \quad \text{(dalam Hz)} \qquad (5)$$

Persamaan Error Posisi Aksial ($\Delta\theta$)

Untuk menghitung persentase deviasi/error posisi sudut rotasi turntable

$$\Delta\theta = |\theta_{\text{aktual}} - \theta_{\text{target}}|$$

Analisis Hasil terhadap Model Kendali Pulsa

Berdasarkan persamaan (1), jumlah pulsa yang dikirim PLC sebanding dengan sudut target, sedangkan berdasarkan persamaan (2), waktu gerak turntable ditentukan oleh jumlah pulsa dibagi frekuensi pulsa. Selisih waktu respon antara Mode 2 dan Mode 1 yang hanya 0,08 s, dibandingkan waktu respon total sekitar 1,2 s, mengindikasikan bahwa sebagian besar waktu respon berasal dari tahap akuisisi citra, inferensi YOLOv11, dan komunikasi serial, bukan dari gerak turntable. Dengan demikian, peningkatan kecepatan sistem lebih efektif dilakukan pada sisi *vision* dan komunikasi, misalnya dengan menggunakan varian YOLOv11 yang lebih ringan atau protokol komunikasi yang lebih cepat.

Dari persamaan (1), resolusi sudut per pulsa ditentukan oleh PPR encoder, rasio gearbox, dan *electronic gear*. Pada servo industri dengan encoder beresolusi tinggi, resolusi ini umumnya jauh lebih kecil daripada error terukur (0,31°–0,40°), sehingga error posisi tidak disebabkan oleh kuantisasi pulsa. Error lebih mungkin berasal dari faktor mekanis seperti *backlash* gearbox, kelonggaran kopling, dan inersia turntable saat berhenti. Dugaan ini didukung oleh dua hal. Pertama, error tetap muncul pada Mode 1 (0°), yang menunjukkan adanya komponen error dasar dari sistem mekanis. Kedua, error bertambah pada Mode 2 seiring bertambahnya sudut perpindahan, yang konsisten dengan akumulasi *backlash* dan efek inersia pada perpindahan yang lebih jauh.

Perbandingan dengan penelitian sebelumnya

Table 2.Perbandingan Metode Switching dengan Metode Sebelumnya

Penelitian	Metode identifikasi	Kontroler	Hasil Utama	Kebutuhan Tambahan
[1]	Operator memilih atau memprogram ulang	Kontroler robot	Bergantung pada keahlian programmer	Pemrograman ulang setiap produk baru
[11]	RFID	ESP32	Akurasi baca 98,7%, error servo ±1,2°, siklus 4,8 s	Tag pada setiap produk
[3]	YOLOv5	PLC Outseal	Akurasi rata-rata 88,26%	Kamera dan PC
[4]	YOLOv5s	Siemens S7-1200	Akurasi 100% (9.600 kemasan), siklus 10–11 s	Kamera dan PC
Penelitian ini	YOLOv11	Mitsubishi FX3U	Keberhasilan 100% (10 siklus per mode), waktu respon 1,21–1,29 s, error 0,31°–0,40°	Kamera dan PC

Dibandingkan *teaching–playback*, metode yang diusulkan menghilangkan kebutuhan pemrograman ulang saat jenis objek berganti. Penambahan jenis produk baru cukup dilakukan dengan menambah kelas pada dataset YOLOv11 dan menyimpan parameter gerak baru pada register PLC, tanpa mengubah logika program utama. Dibandingkan RFID, identifikasi berbasis *vision* tidak memerlukan pemasangan tag pada setiap benda kerja, sehingga tidak ada komponen tambahan yang menempel pada objek yang akan dicat. Error posisi pada penelitian ini (0,31°–0,40°) juga lebih kecil

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2090

dibandingkan sistem berbasis RFID dengan servo berbiaya rendah pada [11] (±1,2°), meskipun perbedaan ini terutama dipengaruhi oleh penggunaan servo industri dengan kendali *pulse train*. Sebagai gantinya, metode *vision* lebih sensitif terhadap kondisi pencahayaan **[3]**. Selain itu, permukaan reflektif juga dapat menurunkan performa deteksi: penerapan YOLO untuk klasifikasi kualitas permukaan ABS hasil metalisasi pada lini produksi hanya mencapai akurasi rata-rata sekitar 70% [12]. Hal ini relevan karena benda kerja pada proses pengecatan dapat memiliki permukaan mengilap. Error posisi pada penelitian ini (0,31°–0,40°) lebih kecil dibandingkan sistem berbasis RFID dan servo hobi pada (±1,2°), meskipun perbedaan ini terutama dipengaruhi oleh penggunaan servo industri dengan kendali *pulse train*. Dibandingkan sistem YOLO–PLC pada [3] dan [4], penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan serupa dapat diterapkan untuk *switching* parameter proses, bukan hanya untuk *sorting* atau *stacking*. Perlu dicatat bahwa perbandingan ini bersifat indikatif, karena setiap penelitian menggunakan tugas, perangkat, dan jumlah pengujian yang berbeda.

Implikasi Penerapan

Waktu respon sekitar 1,3 s relatif kecil dibandingkan durasi proses pengecatan satu benda kerja yang umumnya berlangsung puluhan detik, sehingga *overhead* proses *switching* tidak menjadi hambatan utama pada siklus produksi. Karena parameter gerak tersimpan di memori PLC dan telah tervalidasi sebelumnya, risiko kesalahan *setting* manual saat pergantian produk dapat dihindari. Deteksi berbasis YOLO juga telah digunakan untuk pelacakan kejadian secara *real-time* dalam sinkronisasi *digital twin* pada sistem perakitan robot, yang menunjukkan bahwa keluaran *vision* dapat berperan sebagai sumber sinyal sinkronisasi dalam sel robotik. Karakteristik ini menjadikan pendekatan *memory-based switching* sesuai untuk lini pengecatan dengan variasi produk tinggi dan volume rendah. Namun, penerapannya masih perlu didukung pengujian lanjutan dengan jumlah kelas objek yang lebih banyak dan kondisi pencahayaan yang bervariasi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah mengimplementasikan strategi *memory-based switching* mode pengecatan yang mengintegrasikan klasifikasi objek berbasis YOLO11 dengan PLC Mitsubishi FX3U dan turntable servo. Pada pengujian 10 siklus untuk masing-masing mode, model klasifikasi menghasilkan *confidence score* 0,97 dan 0,98, dengan tingkat keberhasilan *switching* 100%, rata-rata waktu respon 1,21 s dan 1,29 s, serta error posisi 0,31° dan 0,40° untuk Mode 1 (0°) dan Mode 2 (90°). Hasil ini menunjukkan bahwa hasil klasifikasi visual dapat digunakan sebagai pemicu pemanggilan parameter gerak di PLC tanpa pemrograman ulang, sehingga berpotensi menjadi alternatif metode *teaching–playback* pada lini pengecatan dengan variasi produk. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, yaitu dataset dan jumlah kelas objek yang terbatas, pengujian yang hanya mencakup dua mode dengan 10 siklus per mode, belum adanya pengujian pada objek dengan bentuk kompleks dan kondisi pencahayaan bervariasi, serta belum dievaluasinya kualitas hasil pengecatan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas dataset dan jumlah mode, menambah jumlah siklus pengujian untuk validasi keandalan, menguji ketahanan model terhadap variasi pencahayaan, mengurangi *backlash* mekanis untuk meningkatkan akurasi posisi, serta mengevaluasi kualitas lapisan cat secara kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. M. Weber, E. Gambao, and A. Brunete, "A Survey on Autonomous Offline Path Generation for Robot-Assisted Spraying Applications," *Actuators*, vol. 12, no. 11, 2023, doi: 10.3390/act12110403.

[2] G. Tiboni, R. Camoriano, and T. Tommasi, "PaintNet: Unstructured Multi-Path Learning from 3D Point Clouds for Robotic Spray Painting," *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, no. October 2026, pp. 3857–3864, 2023, doi: 10.1109/IROS55552.2023.10341480.

[3] D. S. Pamungkas, Shendy Saputra, and Anastasya Andaresta Pelmelay, "Rancang Bangun dan Evaluasi Sistem Sortir Otomatis Barang dengan Metode Deteksi Objek YOLO v5 dan Kendali PLC Outseal," *J. Appl. Comput. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 57–66, 2025, doi: 10.52158/jacost.v6i1.1165.

[4] A. S. Ozer and I. Cinar, "Real-Time and Fully Automated Robotic Stacking System with Deep Learning-Based Visual Perception," *Sensors*, vol. 25, no. 22, pp. 1–38, 2025, doi: 10.3390/s25226960.

[5] A. Gaugenrieder, H. Hara, J. Möhrle, and R. Daub, "ScienceDirect Planning Method for Skill-Based Control of Robots Using a PLC as Skill Trigger," vol. 00, pp. 16–18, 2025.

[6] H. Chen, "Deep Learning for PLC-Based Industrial Robots," *Appl. Comput. Eng.*, vol. 240, no. 1, pp. 60–66, 2026, doi: 10.54254/2755-2721/2026.gu33574.

[7] M. Mikhail and W. Sealy, "ConGambaration of a PLC Controlled Articulated Robot for Autonomous Vision Inspection Applications," *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2022-July, pp. 1–7, 2022, doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.347.

[8] R. Raihan and M. F. Jauhari, "Prototype design of automated goods sorting process based on outseal PLC," *BIS Energy Eng.*, vol. 1, p. V124030, 2024, doi: 10.31603/biseeng.87.
[9] R. Khanam and M. Hussain, "YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements," vol. 2024, pp. 1–9, 2024, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2410.17725
[10] L. T. Niño and H. A. A. Gardi, "Synthetic-to-Real Object Detection using YOLOv11 and Domain Randomization Strategies," 2025, [Online]. Available: http://arxiv.org/abs/2509.15045
[11] S. Yilmaz, C. Akay, and F. Kaysi, "Design and Implementation of a Low-Cost IoT-Based Robotic Arm for Product Feeding and Sorting in Manufacturing Lines," *Electron.*, vol. 14, no. 24, pp. 1–26, 2025, doi: 10.3390/electronics14244801.
[12] Y. W. Chen and J. M. Shiu, "An implementation of YOLO-family algorithms in classifying the product quality for the acrylonitrile butadiene styrene metallization," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 119, no. 11, pp. 8257–8269, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08676-5.