

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dan dasar dalam pengembangan penelitian yang dilakukan. Selain itu, kajian penelitian terdahulu bertujuan untuk mengetahui perkembangan teknologi yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya serta mengidentifikasi perbedaan dan kebaruan penelitian yang akan dilakukan.

No	Peneliti	Judul Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan Penelitian Ini
1	Randy Hardiansyah (2018)	<i>Kendali Posisi Linear Actuator Berbasis PID Menggunakan PLC</i>	PID dan PLC	Sistem mampu mengontrol posisi linear actuator dengan stabil serta menghasilkan respon yang baik terhadap perubahan setpoint [10].	Penelitian tersebut berfokus pada kontrol posisi linear actuator, sedangkan penelitian ini menerapkan kontrol PID pada sistem mesin potong material dengan umpan balik rotary encoder, HMI, dan mekanisme pemotongan otomatis.
2	Heru Suprpto (2021)	<i>Rancang Bangun Sistem Kontrol Mesin Auto Lathe Berbasis</i>	PLC Mitsubishi	Sistem otomatis mampu meningkatkan efisiensi proses kerja mesin	Penelitian tersebut hanya menggunakan PLC Mitsubishi sebagai pengendali sistem tanpa

		<i>PLC Mitsubishi</i>		dan mempermu dah pengoperasian mesin produksi [3].	penerapan metode PID dan kontrol posisi. Penelitian ini mengintegrasikan PLC Mitsubishi, HMI, rotary encoder, dan PID untuk meningkatkan akurasi panjang pemotongan.
3	Yulia Dwi Satriai (2023)	<i>Kontrol Posisi Motor Servo Berbasis HMI</i>	HMI dan Motor Servo	Sistem monitoring dan pengendalian posisi motor servo dapat dilakukan secara real time melalui HMI [11].	Penelitian tersebut menggunakan motor servo sebagai objek kontrol dan tidak diterapkan pada sistem pemotongan material. Penelitian ini menerapkan HMI dan PID pada mesin potong berbasis PLC Mitsubishi dengan pengukuran panjang menggunakan rotary encoder.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Randy Hardiansyah, Heru Suprpto, dan Yulia Dwi Satriani, dapat diketahui bahwa penggunaan PLC, HMI, dan metode PID mampu meningkatkan kinerja sistem kontrol baik dari segi akurasi, kestabilan, maupun kemudahan pengoperasian sistem [3],[11]. Penelitian Randy Hardiansyah menunjukkan bahwa metode PID efektif digunakan untuk mengendalikan posisi aktuator secara stabil, sedangkan penelitian Heru Suprpto membuktikan bahwa PLC Mitsubishi mampu meningkatkan efisiensi sistem otomasi industri. Sementara itu, penelitian Yulia Dwi Satriani menunjukkan bahwa HMI dapat digunakan sebagai media monitoring dan pengendalian posisi secara real time. Meskipun demikian, dari ketiga penelitian tersebut belum ditemukan penelitian yang secara khusus mengintegrasikan PLC Mitsubishi, HMI, metode PID, rotary encoder, dan motor stepper pada sistem kontrol posisi mesin potong material baja. Selain itu, penelitian sebelumnya belum membahas pengendalian panjang material berdasarkan pembacaan pulsa encoder yang digunakan sebagai umpan balik untuk mengoreksi posisi pemotongan secara otomatis [4].

Oleh karena itu, penelitian "Rancang Bangun Prototype Sistem Control Mesin Potong Berbasis PLC Mitsubishi dan HMI dengan Metode PID Kontrol Posisi di CV Perjuangan Steel Surabaya" dilakukan untuk mengisi kekurangan tersebut dengan mengembangkan sistem yang mampu melakukan pengukuran panjang material secara otomatis, mengoreksi error menggunakan metode PID, serta menampilkan data pemotongan secara real time melalui HMI. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem pemotongan yang lebih akurat, stabil, dan efisien dibandingkan sistem yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya [2],[4].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Penjelasan Sistem Secara Umum

Rancang Bangun Prototype Sistem Kontrol Mesin Potong Berbasis PLC Mitsubishi dan HMI dengan Metode PID Kontrol Posisi merupakan sebuah sistem otomatis yang dirancang untuk melakukan pengukuran dan pemotongan material berdasarkan panjang yang telah ditentukan oleh operator. Sistem ini memanfaatkan PLC Mitsubishi sebagai pengendali utama, HMI (Human Machine Interface) sebagai media interaksi antara operator dan mesin, serta metode PID (Proportional Integral Derivative) untuk meningkatkan akurasi kontrol posisi panjang material [8].

Secara umum, sistem bekerja dengan cara menarik material menggunakan motor stepper yang digerakkan oleh driver motor. Pergerakan

material diukur secara real-time menggunakan rotary encoder yang dipasang pada mekanisme penggerak. Data pulsa yang dihasilkan encoder dikirim ke PLC dan dikonversi menjadi nilai panjang material. Operator memasukkan nilai panjang potong yang diinginkan melalui HMI sebagai set point system [9].

Setelah proses dijalankan, PLC membandingkan panjang aktual yang terbaca dari rotary encoder dengan nilai set point yang telah ditentukan. Selisih antara set point dan panjang aktual disebut error. Nilai error ini kemudian diproses menggunakan algoritma PID untuk menghasilkan sinyal koreksi yang digunakan dalam mengatur kecepatan dan jumlah langkah motor stepper. Dengan adanya kontrol PID, sistem dapat mengurangi overshoot, mempercepat waktu mencapai set point, serta meminimalkan kesalahan pengukuran panjang material [3].

Ketika panjang material telah mencapai nilai set point yang ditentukan, PLC menghentikan pergerakan motor stepper dan mengaktifkan mekanisme pemotongan. Setelah proses pemotongan selesai, sistem kembali ke kondisi awal dan siap menerima perintah pemotongan berikutnya. Sensor proximity digunakan sebagai pendeteksi posisi awal atau batas mekanis guna meningkatkan keamanan dan keandalan sistem. Komponen utama yang digunakan dalam sistem meliputi:

1. PLC Mitsubishi FX3U sebagai pusat pengendalian seluruh proses.
2. HMI Weintek sebagai antarmuka pengaturan parameter dan monitoring sistem.
3. Motor Stepper NEMA 17 sebagai aktuator penggerak material.
4. Driver Stepper TB6600 sebagai pengendali motor stepper.
5. Rotary Encoder 1000ppr sebagai sensor umpan balik posisi dan panjang material.
6. Sensor Proximity sebagai pendeteksi posisi referensi atau batas gerak.
7. Power Supply 24 VDC sebagai sumber daya sistem.

Dengan integrasi PLC, HMI, rotary encoder, motor stepper, dan algoritma PID, prototype mesin potong ini mampu melakukan proses pengukuran dan pemotongan secara otomatis dengan tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Sistem ini juga memberikan kemudahan bagi operator dalam mengatur panjang potong, memantau kondisi mesin, dan meningkatkan efisiensi proses produksi [8].

2.2.2 Programmable Logic Controller (PLC)

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan perangkat kontrol digital yang dirancang untuk mengendalikan proses otomasi pada berbagai aplikasi industri. PLC berfungsi sebagai pengganti sistem kontrol konvensional yang sebelumnya menggunakan banyak relay, timer, dan kontaktor. Dengan menggunakan PLC, proses pengendalian dapat dilakukan secara lebih fleksibel karena logika kerja sistem dapat diubah melalui perangkat lunak tanpa perlu melakukan perubahan rangkaian secara fisik [1].

PLC bekerja dengan prinsip membaca sinyal masukan (input), memproses data sesuai program yang tersimpan di dalam memori, kemudian menghasilkan sinyal keluaran (output) untuk mengendalikan aktuator atau perangkat lain. Proses ini berlangsung secara terus-menerus dalam siklus pemindaian (scan cycle) yang terdiri atas pembacaan input, eksekusi program, dan pembaruan output [12].

Pada sistem otomasi industri, PLC banyak digunakan karena memiliki tingkat keandalan yang tinggi, tahan terhadap gangguan lingkungan industri, mudah diprogram, serta mampu bekerja secara kontinu dalam waktu yang lama. Selain itu, PLC juga memiliki kemampuan untuk berkomunikasi dengan berbagai perangkat eksternal seperti Human Machine Interface (HMI), sensor, inverter, motor servo, motor stepper, dan sistem kontrol lainnya [13].

Secara umum, PLC terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu:

1. **Central Processing Unit (CPU)**
CPU merupakan bagian utama PLC yang berfungsi untuk menjalankan program, melakukan perhitungan logika, mengolah data input, dan mengendalikan output.
2. **Memory (Memori)**
Memori digunakan untuk menyimpan program, data proses, parameter sistem, serta hasil perhitungan yang diperlukan selama PLC beroperasi.
3. **Input Module**
Modul input berfungsi menerima sinyal dari berbagai perangkat masukan seperti push button, sensor proximity, limit switch, dan rotary encoder.
4. **Output Module**
Modul output berfungsi mengirimkan sinyal kendali kepada aktuator seperti motor, relay, solenoid valve, dan driver motor stepper.
5. **Power Supply**
Power supply menyediakan tegangan yang diperlukan agar PLC dapat beroperasi dengan stabil.

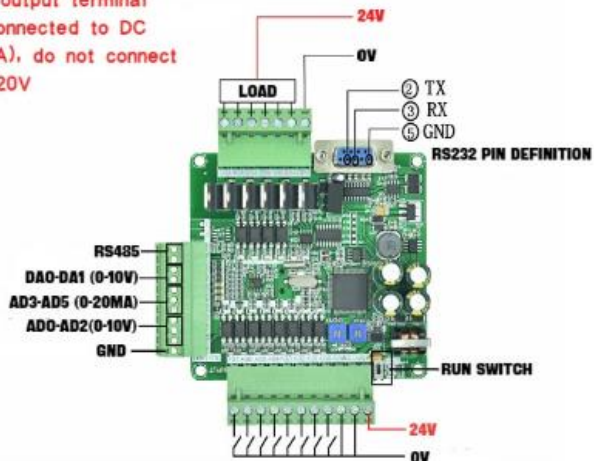
Pada penelitian ini, PLC berfungsi sebagai pusat pengendalian seluruh sistem mesin potong otomatis. PLC menerima data panjang material dari rotary encoder, membaca status sensor proximity, menerima set point panjang pemotongan dari HMI, kemudian mengolah seluruh data tersebut menggunakan algoritma PID. Hasil pengolahan digunakan untuk mengendalikan motor stepper sehingga panjang material yang dipotong sesuai dengan nilai yang telah ditentukan.

Selain berfungsi sebagai pengontrol utama, PLC juga melakukan proses monitoring terhadap kondisi sistem secara real-time. Dengan adanya PLC, proses pengukuran panjang material, pengendalian motor, dan proses pemotongan dapat dilakukan secara otomatis sehingga meningkatkan akurasi, efisiensi, dan konsistensi hasil produksi.

Pada penelitian ini digunakan PLC Mitsubishi seri FX3U karena memiliki kemampuan pemrosesan yang cepat, mendukung fungsi high-speed counter untuk membaca pulsa encoder, serta memiliki fitur pulse output yang sangat sesuai untuk pengendalian motor stepper pada aplikasi kontrol posisi [10].

FX3U-14MT WIRING DIAGRAM

Remarks: The output terminal can only be connected to DC load (within 3A), do not connect to AC or AC220V



Gambar 2.1 PLC FX3U-14MT

2.2.3 PLC Mitsubishi FX3U-14MT

PLC Mitsubishi FX3U-14MT merupakan salah satu PLC seri FX3U yang diproduksi oleh Mitsubishi Electric. Seri FX3U dikenal sebagai PLC dengan performa tinggi yang dirancang untuk kebutuhan sistem otomasi industri yang memerlukan kecepatan pemrosesan dan akurasi yang baik. PLC ini banyak digunakan pada sistem pengendalian mesin produksi, conveyor, packaging, positioning system, dan berbagai aplikasi otomasi lainnya.

Kode FX3U-14MT menunjukkan bahwa PLC memiliki total 14 titik I/O yang terdiri atas 8 input digital dan 6 output transistor. Jenis output transistor pada PLC ini memberikan keuntungan berupa kemampuan menghasilkan pulsa berkecepatan tinggi yang diperlukan dalam pengendalian motor stepper maupun motor servo [14]. Spesifikasi utama PLC Mitsubishi FX3U-14MT dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi PLC Mitsubishi FX3U-14MT

Parameter	Spesifikasi
Tipe PLC	Mitsubishi FX3U-14MT
Tegangan Kerja	24 VDC
Jumlah Input	8 Input Digital
Jumlah Output	6 Output Transistor
Program Memory	Hingga 64.000 langkah
High Speed Counter	Hingga 60 kHz
Pulse Output	Hingga 100 kHz
Komunikasi	RS-422, RS-485 (modul tambahan)
Bahasa Pemrograman	Ladder Diagram
Metode Output	Transistor

Salah satu keunggulan utama PLC FX3U-14MT adalah kemampuannya dalam membaca sinyal pulsa berkecepatan tinggi menggunakan fitur **High Speed Counter (HSC)**. Fitur ini memungkinkan PLC membaca pulsa dari rotary encoder secara akurat tanpa kehilangan data meskipun frekuensi pulsa cukup tinggi.

Pada penelitian ini, rotary encoder 1000ppr digunakan sebagai sensor umpan balik untuk mengukur panjang material yang bergerak. Setiap putaran encoder menghasilkan sejumlah pulsa yang dihitung oleh High Speed Counter PLC. Data pulsa tersebut kemudian dikonversi menjadi nilai panjang material dan digunakan sebagai masukan sistem kontrol PID [13].

Selain High Speed Counter, PLC FX3U-14MT juga memiliki fitur **Pulse Train Output (PTO)** yang memungkinkan PLC menghasilkan pulsa

berkecepatan tinggi hingga 100 kHz. Pulsa ini digunakan untuk mengendalikan driver motor stepper TB6600 melalui terminal output PLC. Prinsip pengendalian motor stepper menggunakan PLC FX3U-14MT adalah sebagai berikut:

1. PLC menghasilkan sinyal pulsa melalui output Y0.
2. Jumlah pulsa menentukan jarak atau posisi pergerakan motor stepper.
3. Frekuensi pulsa menentukan kecepatan putaran motor.
4. Output Y1 digunakan untuk menentukan arah putaran motor stepper.
5. Driver TB6600 menerjemahkan sinyal tersebut menjadi arus penggerak motor stepper.

Pada sistem mesin potong otomatis yang dikembangkan, PLC FX3U-14MT berperan sebagai pusat pengontrol yang melakukan beberapa fungsi utama, yaitu:

- Membaca data panjang material dari rotary encoder.
- Menerima nilai set point dari HMI.
- Menghitung error antara panjang aktual dan panjang target.
- Melakukan proses kontrol PID.
- Menghasilkan pulsa penggerak motor stepper.
- Mengontrol proses pemotongan material.
- Melakukan monitoring dan proteksi sistem.

Pemilihan PLC Mitsubishi FX3U-14MT dalam penelitian ini didasarkan pada beberapa pertimbangan, yaitu:

1. Memiliki fitur High Speed Counter yang mendukung pembacaan rotary encoder secara akurat.
2. Memiliki Pulse Output berkecepatan tinggi yang sesuai untuk pengendalian motor stepper.
3. Kompatibel dengan HMI Weintek yang digunakan pada sistem.
4. Memiliki stabilitas dan keandalan tinggi untuk aplikasi industri.
5. Mudah diprogram menggunakan perangkat lunak GX Works atau GX Developer.
6. Banyak digunakan di dunia industri sehingga memudahkan proses pengembangan dan pemeliharaan sistem.

Dengan kemampuan tersebut, PLC Mitsubishi FX3U-14MT sangat sesuai digunakan sebagai pengendali utama pada prototype sistem kontrol mesin potong berbasis PID karena mampu mengintegrasikan fungsi pengukuran panjang material, kontrol posisi, komunikasi HMI, dan pengendalian motor stepper dalam satu sistem yang terintegrasi [14],[15].

2.2.4 Antarmuka Manusia Mesin (HMI)

Human Machine Interface (HMI) merupakan perangkat antarmuka yang digunakan untuk menghubungkan operator dengan sistem kontrol atau mesin otomatis. HMI berfungsi sebagai media komunikasi antara manusia dan mesin sehingga operator dapat melakukan pengawasan, pengaturan, serta pengendalian proses secara mudah dan efisien. Dalam sistem otomasi modern, HMI menjadi salah satu komponen penting karena mampu menyajikan informasi proses dalam bentuk visual yang mudah dipahami oleh pengguna.

Secara umum, HMI berupa layar sentuh (touchscreen) yang menampilkan berbagai informasi mengenai kondisi sistem secara real-time. Informasi tersebut dapat berupa nilai sensor, status aktuator, alarm, grafik proses, maupun parameter pengaturan sistem. Melalui tampilan HMI, operator tidak perlu berinteraksi langsung dengan program PLC sehingga proses pengoperasian menjadi lebih praktis dan aman [16].

Pada sistem kontrol industri, HMI berfungsi sebagai media untuk menampilkan data yang diproses oleh PLC sekaligus mengirimkan perintah dari operator ke PLC. Data yang ditampilkan pada HMI diperoleh melalui proses komunikasi antara HMI dan PLC menggunakan protokol komunikasi tertentu. Dengan adanya komunikasi tersebut, operator dapat memonitor kondisi sistem secara langsung tanpa harus membuka perangkat lunak pemrograman PLC [2].

Fungsi utama HMI dalam sistem kontrol meliputi:

1. Monitoring Sistem

HMI digunakan untuk menampilkan kondisi aktual sistem secara real-time. Informasi yang dapat ditampilkan antara lain status motor, nilai sensor, panjang material, jumlah produksi, alarm, dan kondisi input-output PLC.

2. Pengaturan Parameter Sistem

HMI memungkinkan operator memasukkan nilai parameter yang diperlukan sistem, seperti set point panjang pemotongan, kecepatan motor, jumlah produksi, serta parameter kontrol PID.

3. Pengendalian Sistem

Operator dapat menjalankan atau menghentikan proses melalui tombol virtual yang tersedia pada layar HMI, seperti tombol Start, Stop, Reset, dan Manual Control.

4. Menampilkan Alarm dan Diagnostik

HMI dapat memberikan informasi apabila terjadi kesalahan pada sistem, seperti sensor tidak aktif, motor tidak berjalan, atau komunikasi PLC terputus.

5. Pencatatan dan Penyimpanan Data

Beberapa jenis HMI mampu menyimpan data proses untuk keperluan analisis dan evaluasi performa sistem. Dalam penelitian ini, HMI digunakan sebagai media interaksi antara operator dan prototype mesin potong otomatis. Operator dapat memasukkan panjang material yang diinginkan sebagai set point, mengatur parameter PID, serta memantau hasil pengukuran panjang material secara langsung pada layar HMI.

Penggunaan HMI memberikan beberapa keuntungan dibandingkan panel kontrol konvensional yang menggunakan banyak tombol dan lampu indikator. Keuntungan tersebut antara lain:

- Mengurangi jumlah komponen panel kontrol.
- Mempermudah pengoperasian sistem.
- Menampilkan informasi secara lebih lengkap.
- Mempermudah proses monitoring.
- Mengurangi kemungkinan kesalahan operator.
- Meningkatkan efisiensi dan produktivitas kerja.

Pada sistem mesin potong berbasis PLC Mitsubishi yang dikembangkan, HMI berperan sebagai pusat monitoring dan pengaturan parameter. Seluruh informasi mengenai proses pengukuran panjang material, status motor stepper, pembacaan rotary encoder, dan nilai PID dapat ditampilkan secara real-time sehingga operator dapat mengetahui kondisi sistem setiap saat [7].

Dengan adanya HMI, proses pengoperasian mesin menjadi lebih sederhana karena operator cukup memasukkan nilai yang diinginkan melalui layar sentuh tanpa harus melakukan pengaturan langsung pada PLC. Oleh

karena itu, penggunaan HMI dapat meningkatkan kemudahan pengoperasian,



efektivitas kontrol, dan keandalan sistem secara keseluruhan [1].

Gambar 2.2 HMI Weintek atau Weinview

2.2.5 HMI Weintek MT6071iP

HMI Weintek MT6071iP merupakan salah satu perangkat Human Machine Interface yang banyak digunakan dalam sistem otomasi industri karena memiliki performa yang baik, tampilan yang responsif, serta kompatibilitas yang luas dengan berbagai merek PLC. HMI ini diproduksi oleh **Weintek Labs** dan dirancang untuk aplikasi monitoring serta pengendalian mesin industri.

Pada penelitian ini, HMI Weintek MT6071iP digunakan sebagai media komunikasi antara operator dan PLC Mitsubishi FX3U-14MT. HMI berfungsi untuk menampilkan data proses secara real-time serta memberikan fasilitas pengaturan parameter yang diperlukan dalam sistem kontrol mesin potong otomatis [9].

Secara fisik, HMI Weintek MT6071iP dilengkapi layar sentuh berukuran 7 inci yang mampu menampilkan berbagai informasi dalam bentuk angka, indikator, grafik, maupun tombol virtual. Layar sentuh tersebut memungkinkan operator melakukan pengaturan sistem dengan mudah tanpa

memerlukan perangkat tambahan. Spesifikasi utama HMI Weintek MT6071iP ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi HMI Weintek MT6071iP

Parameter	Spesifikasi
Tipe HMI	Weintek MT6071iP
Ukuran Layar	7 Inch
Resolusi	800 × 480 Pixel
Jenis Layar	TFT LCD Color Touch Screen
Tegangan Kerja	24 VDC
Memori Flash	128 MB
RAM	128 MB
Port Komunikasi	RS-232, RS-485
Ethernet	10/100 Base-T
Software Pemrograman	EasyBuilder Pro
Metode Input	Touchscreen

HMI Weintek MT6071iP memiliki kemampuan komunikasi yang sangat baik dengan PLC Mitsubishi FX3U. Komunikasi data antara HMI dan PLC dilakukan melalui protokol serial RS-232 sehingga data dapat ditransfer secara cepat dan stabil.

Dalam sistem penelitian ini, PLC bertindak sebagai pengolah data utama, sedangkan HMI berfungsi sebagai perangkat monitoring dan pengaturan parameter. Data yang ditampilkan pada HMI diperoleh dari register-register PLC yang berisi hasil pembacaan sensor, perhitungan PID, dan status system [9].

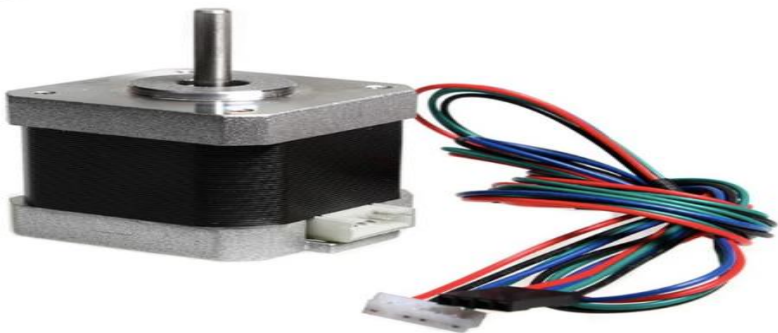
2.2.6 Motor Stepper NEMA 23

Motor stepper merupakan salah satu jenis motor listrik yang bekerja berdasarkan prinsip perubahan pulsa listrik menjadi gerakan sudut tertentu secara bertahap (step by step). Berbeda dengan motor DC konvensional yang berputar secara kontinu ketika diberikan tegangan, motor stepper bergerak dalam langkah-langkah kecil yang memiliki nilai sudut tetap. Setiap pulsa listrik yang diterima motor akan menghasilkan satu langkah pergerakan, sehingga posisi putaran motor dapat dikontrol dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Motor stepper banyak digunakan pada sistem otomasi, mesin CNC, printer 3D, robot industri, mesin pemotong otomatis, dan berbagai aplikasi

yang memerlukan kontrol posisi yang presisi. Kemampuan motor stepper untuk bergerak sesuai jumlah pulsa yang diberikan menjadikannya sangat cocok digunakan pada sistem kontrol posisi yang membutuhkan ketelitian tinggi.

Pada penelitian ini, motor stepper digunakan sebagai aktuator utama yang berfungsi menarik material menuju area pemotongan. Pergerakan motor dikendalikan oleh PLC Mitsubishi FX3U melalui driver motor stepper TB6600. Setiap pulsa yang dihasilkan PLC akan diterjemahkan oleh driver menjadi langkah pergerakan motor, sehingga panjang material yang bergerak



dapat dikontrol sesuai set point yang telah ditentukan [13].

Gambar 2.3 Motor Stepper Nema 23

2.2.6.1.Prinsip Kerja Motor Stepper

Prinsip kerja motor stepper didasarkan pada interaksi medan magnet antara stator dan rotor. Stator terdiri dari beberapa kumparan elektromagnetik yang disusun dalam beberapa fase, sedangkan rotor umumnya terbuat dari magnet permanen atau material feromagnetik [13].

Ketika salah satu kumparan stator diberi arus listrik, akan terbentuk medan magnet yang menarik rotor ke posisi tertentu. Selanjutnya, kumparan lain akan diaktifkan secara bergantian sesuai urutan tertentu sehingga rotor bergerak mengikuti perubahan medan magnet tersebut.

Setiap perpindahan posisi rotor akibat perubahan medan magnet disebut satu langkah (step). Dengan mengatur jumlah pulsa yang diberikan ke motor, posisi rotor dapat ditentukan secara tepat.

Secara matematis, sudut langkah motor stepper dapat dihitung menggunakan persamaan:

Rumus (2.1)

$$\theta = \frac{360^\circ}{N}$$

Keterangan:

θ = Sudut Langkah Motor

N = Jumlah Langkah Dalam Satu Putaran

Sebagai contoh, motor stepper dengan sudut langkah $1,8^\circ$ memiliki:

$$N = \frac{360^\circ}{1,8} = 200 \text{ Langkah}$$

Artinya, motor memerlukan 200 pulsa untuk menyelesaikan satu putaran penuh sebesar 360° . Karena setiap pulsa menghasilkan langkah yang pasti, maka posisi motor dapat dikontrol dengan sangat akurat tanpa memerlukan sistem umpan balik tambahan. Namun, pada aplikasi yang membutuhkan ketelitian lebih tinggi seperti penelitian ini, digunakan rotary encoder sebagai umpan balik untuk memverifikasi panjang material yang telah bergerak. Pada penelitian ini, motor stepper NEMA 23 dipilih karena mampu menghasilkan torsi yang cukup untuk menggerakkan roll penarik material serta mempertahankan akurasi posisi selama proses pengukuran panjang berlangsung [13],[6].

2.2.6.2 Spesifikasi Umum Motor Stepper NEMA 23

Tabel 2.3 menunjukkan spesifikasi umum motor stepper NEMA 23 yang digunakan pada penelitian.

Tabel 2.3 Spesifikasi Motor Stepper NEMA 23

Parameter	Nilai
Tipe Motor	Hybrid Stepper Motor
Standar Frame	NEMA 23
Sudut Langkah	$1,8^\circ$
Langkah per Putaran	200 Step
Tegangan Kerja	24 VDC
Arus Nominal	2,8 – 4,2 A
Torsi Holding	1,2 – 3 Nm
Jumlah Fasa	2 Fasa
Diameter Poros	$\pm 6,35 \text{ mm}$

Motor stepper NEMA 23 memiliki torsi yang lebih besar dibandingkan motor NEMA 23 sehingga lebih cocok digunakan pada sistem yang membutuhkan gaya tarik lebih tinggi.

2.2.6.3 Karakteristik Motor Stepper NEMA 23

Motor stepper NEMA 23 memiliki beberapa karakteristik yang mendukung penggunaannya pada sistem kontrol posisi diantaranya;

1. Akurasi Posisi Tinggi

Motor stepper mampu bergerak sesuai jumlah pulsa yang diberikan. Setiap pulsa menghasilkan sudut putaran yang tetap sehingga posisi motor dapat ditentukan dengan akurat.

2. Torsi Penahan (Holding Torque) Besar

Ketika motor berhenti, rotor tetap mampu mempertahankan posisinya tanpa bergeser karena adanya torsi penahan yang cukup besar.

3. Respon Cepat

Motor stepper mampu merespons perubahan perintah dengan cepat karena sistem penggeraknya berbasis pulsa digital.

4. Mudah Dikendalikan PLC

Motor stepper dapat dikendalikan secara langsung menggunakan sinyal Pulse dan Direction yang dihasilkan oleh PLC Mitsubishi FX3U.

5. Stabil pada Sistem Kontrol Posisi

Motor stepper sangat sesuai untuk aplikasi positioning karena setiap pergerakan dapat dihitung berdasarkan jumlah pulsa yang dikirimkan.

2.2.6.4 Penggunaan Motor Stepper NEMA 23 pada Sistem

Pada penelitian ini, motor stepper NEMA 23 digunakan sebagai penggerak utama mekanisme penarik material. PLC Mitsubishi FX3U menghasilkan sinyal pulsa yang dikirimkan ke driver TB6600. Driver kemudian mengatur arus yang masuk ke kumparan motor sehingga motor berputar sesuai jumlah pulsa yang diterima. Putaran motor diteruskan ke roll penarik material sehingga material bergerak menuju area pemotongan. Selama proses berlangsung, rotary encoder mengukur panjang material yang bergerak dan mengirimkan data umpan balik ke PLC.

PLC kemudian membandingkan panjang aktual dengan set point yang dimasukkan melalui HMI. Apabila masih terdapat error, algoritma PID akan menghasilkan sinyal koreksi yang digunakan untuk mengatur pergerakan motor hingga panjang material mencapai nilai yang diinginkan.

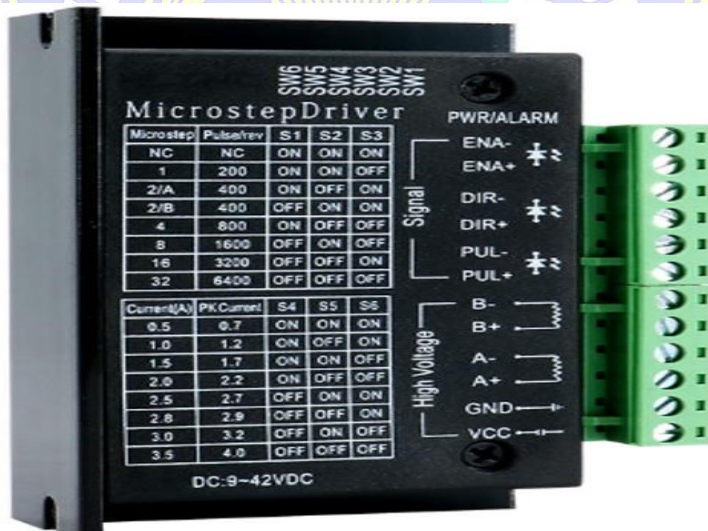
Dengan penggunaan motor stepper NEMA 23, sistem mampu menghasilkan pergerakan yang presisi, stabil, dan mudah dikendalikan. Kemampuan tersebut sangat penting untuk mendukung proses pengukuran panjang material serta meningkatkan akurasi hasil pemotongan pada prototype mesin potong berbasis PLC Mitsubishi dan metode PID kontrol posisi [13],[6].

2.2.7 Driver TB6600

Driver motor stepper merupakan perangkat elektronika yang berfungsi sebagai penghubung antara sistem kontrol dan motor stepper. Driver bertugas menerima sinyal kontrol dari PLC, kemudian mengubah sinyal tersebut menjadi arus dan tegangan yang sesuai untuk menggerakkan kumparan motor stepper. Tanpa adanya driver, PLC tidak mampu menggerakkan motor stepper secara langsung karena arus keluaran PLC sangat kecil dibandingkan kebutuhan arus motor.

Pada penelitian ini digunakan driver stepper TB6600 sebagai pengendali motor stepper NEMA 23. Driver TB6600 dipilih karena memiliki kemampuan mengendalikan motor stepper dua fasa dengan arus yang relatif besar, mendukung pengaturan microstepping, serta kompatibel dengan output pulsa berkecepatan tinggi yang dimiliki PLC Mitsubishi FX3U-14MT.

TB6600 banyak digunakan pada sistem CNC, mesin laser cutting, mesin engraving, printer industri, dan berbagai sistem kontrol posisi karena memiliki tingkat kestabilan yang baik serta mampu menghasilkan pergerakan motor yang lebih halus dibandingkan metode penggerakan konvensional [8].



Gambar 2.4 Driver Sepper TB6600

2.2.7.1 Fungsi Driver TB6600

Driver TB6600 memiliki beberapa fungsi utama dalam sistem kontrol posisi, yaitu:

1. Menerima sinyal Pulse dan Direction dari PLC.
2. Mengatur urutan pemberian arus pada kumparan motor stepper.
3. Mengontrol arah putaran motor.
4. Mengatur kecepatan putaran motor.
5. Mengatur jumlah langkah motor sesuai pulsa yang diterima.
6. Menyesuaikan arus kerja motor agar tidak terjadi overheating.
7. Meningkatkan ketelitian posisi melalui pengaturan microstepping.

Dalam penelitian ini, driver TB6600 menjadi komponen penting karena berfungsi menerjemahkan perintah dari PLC menjadi gerakan mekanis pada motor stepper NEMA 23 yang digunakan untuk menarik material menuju area pemotongan.

2.2.7.2 Prinsip Kerja Driver TB6600

Prinsip kerja TB6600 dimulai ketika PLC mengirimkan sinyal digital ke terminal input driver. Sinyal tersebut kemudian diproses oleh rangkaian internal TB6600 untuk menghasilkan arus pada kumparan motor stepper. Setiap pulsa yang diterima akan menghasilkan satu langkah pergerakan motor sesuai pengaturan microstepping yang digunakan. Semakin banyak pulsa yang diberikan, semakin jauh motor bergerak. Secara umum hubungan kerja sistem dapat digambarkan sebagai berikut:

PLC FX3U → Y0,Y1 (pulse), Y4,Y5 (direction) → Diver TB6600 → Motor Stepper NEMA23 → Roll Penarik Material.
--

2.2.7.3 Terminal Input Driver TB6600

TB6600 memiliki enam terminal input kontrol, yaitu:

Terminal	Fungsi
PUL+	Input pulsa positif
PUL+	Input pulsa positif
DIR-	Input arah negative
DIR-	Input arah negative
ENA+	Enable positif
ENA-	Enable negative

Pada penelitian ini digunakan konfigurasi:

PLC FX3U	TB6600
Y0	PUL
Y1	PUL
Y4	DIR-
Y5	DIR-
24VDC	PUL+
24VDC	DIR
COM PLC	Npn Sistem

2.2.7.4 Sinyal Pulse (PUL)

Sinyal Pulse merupakan sinyal utama yang digunakan untuk menentukan jumlah langkah pergerakan motor stepper. Setiap pulsa yang diterima driver akan menghasilkan pergerakan motor sebesar satu langkah atau sebagian langkah sesuai pengaturan microstepping.

- 200 pulsa = 1 putaran motor (full step)
- 400 pulsa = 1 putaran (half step)
- 1600 pulsa = 1 putaran (1/8 step)

Semakin tinggi frekuensi pulsa yang diberikan PLC, semakin cepat motor berputar. Hubungan frekuensi dan kecepatan motor dapat dituliskan sebagai:

Rumus (2.2)

$$RPM = \frac{f \times 60}{\text{Step/Revolusi}}$$

Keterangan:

RPM = Kecepatan motor (rpm)

f = Frekuensi pulsa (Hz)

Step/Revolution = Jumlah langkah per putaran

2.2.7.5 Sinyal Direction (DIR)

Sinyal Direction digunakan untuk menentukan arah putaran motor.

Logika yang umum digunakan:

Status DIR	Arah Putaran
OFF (0)	CW (Clockwise)
ON (1)	CCW (Counter Clockwise)

Pada mesin potong otomatis:

- CW digunakan untuk menarik material maju.
- CCW digunakan untuk proses koreksi atau pengembalian posisi.

2.2.7.6 Sinyal Enable (ENA)

Terminal ENA digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan driver.

Status ENA	Fungsi
ON	Driver aktif
OFF	Driver nonaktif

Pada banyak aplikasi ENA tidak digunakan dan driver selalu aktif selama sistem menyala.

2.2.7.7 Pengaturan Microstepping

Microstepping merupakan metode pembagian satu langkah motor menjadi beberapa langkah yang lebih kecil sehingga pergerakan motor menjadi lebih halus dan akurat. TB6600 menyediakan enam buah DIP Switch yang digunakan untuk pengaturan resolusi langkah dan arus motor. Switch SW1, SW2, dan SW3 digunakan untuk mengatur microstepping.

Tabel 2.4 Pengaturan Microstepping TB6600

SW1	SW2	SW3	Pulsa/Putaran
OFF	OFF	OFF	200
ON	OFF	OFF	400
OFF	ON	OFF	800
ON	ON	OFF	1600
OFF	OFF	ON	3200
ON	OFF	ON	6400

Untuk penelitian pengukuran panjang menggunakan rotary encoder dan PLC FX3U, pengaturan yang paling stabil adalah:

1600 pulsa/putaran (1/8 step)

Pengaturan:
SW1 = ON
SW2 = ON
SW3 = OFF

Keuntungan:

- Gerakan motor lebih halus.
- Getaran motor berkurang.
- Akurasi panjang lebih baik.
- Beban PLC masih ringan.

2.2.7.8 Pengaturan Arus Motor (Current Setting)

Switch SW4, SW5, dan SW6 digunakan untuk menentukan batas arus maksimum motor.

Tabel 2.5 Pengaturan Arus TB6600

SW4	SW5	SW6	Arus Maksimum
OFF	OFF	OFF	0,5 A
ON	OFF	OFF	1,0 A
OFF	ON	OFF	1,5 A
ON	ON	OFF	2,0 A
OFF	OFF	ON	2,5 A
ON	OFF	ON	3,0 A
OFF	ON	ON	3,5 A
ON	ON	ON	4,0 A

2.2.7.9 Pengaturan yang Sesuai untuk Motor NEMA 23

Motor stepper NEMA 23 yang digunakan pada sistem mesin potong memiliki spesifikasi:

- Sudut langkah : 1,8°
- Arus nominal : 2,8 A
- Torsi : 1,8–3 Nm

Agar motor bekerja optimal dan tidak cepat panas, pengaturan yang sesuai dengan sistem adalah:

2.2.7.9.1 Opsi 1 (Paling Aman)

Microstep = 1600 Pulse/Rev

SW1	ON
SW2	ON
SW3	OFF

Arus = 3,0 A

SW4	ON
SW5	OFF
SW6	ON

Pengaturan ini sangat cocok untuk penelitian dan proses tuning PID karena menghasilkan gerakan halus serta torsi yang cukup besar.

2.2.7.9.2 Opsi 2 (Beban Material Lebih Berat)

Microstep = 1600 Pulse/Rev

SW1	ON
SW2	ON
SW3	OFF

Arus = 3,5 A

SW4	OFF
SW5	ON
SW6	ON

Digunakan apabila material yang ditarik lebih berat dan motor mengalami kehilangan langkah (lost step)

2.2.7.10 Hubungan Driver TB6600 dengan PLC dan Motor Stepper

Pada sistem penelitian ini, PLC Mitsubishi FX3U berfungsi sebagai pengendali utama yang menghasilkan sinyal Pulse dan Direction. Sinyal tersebut diterima oleh TB6600 untuk mengatur pergerakan motor stepper NEMA 23. Rotary encoder yang dipasang pada mekanisme penarik material memberikan umpan balik panjang aktual kepada PLC. PLC kemudian membandingkan panjang aktual dengan set point yang dimasukkan melalui

HMI. Selisih yang terjadi diproses menggunakan algoritma PID untuk menghasilkan koreksi kecepatan dan jumlah pulsa yang dikirim ke driver.

Dengan demikian, TB6600 berfungsi sebagai penghubung utama antara PLC dan motor stepper yang memungkinkan sistem kontrol posisi bekerja secara presisi. Penggunaan pengaturan microstepping 1/8 step (1600 pulsa/putaran) dan arus sekitar 3,0 A sangat sesuai untuk aplikasi mesin potong berbasis PLC Mitsubishi karena mampu menghasilkan gerakan yang halus, akurat, dan stabil selama proses pengukuran panjang material berlangsung [8],[17].

2.2.8 Rotary Encoder

Rotary encoder merupakan sensor elektronik yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur pergerakan putar suatu poros, kemudian mengubah gerakan tersebut menjadi sinyal digital berupa pulsa. Rotary encoder banyak digunakan pada sistem kontrol posisi, sistem otomasi industri, mesin CNC, robotika, conveyor, dan berbagai aplikasi yang memerlukan pengukuran posisi, kecepatan, maupun jarak secara akurat.

Dalam sistem kontrol modern, rotary encoder berfungsi sebagai perangkat umpan balik (feedback sensor) yang memberikan informasi posisi aktual kepada pengendali. Informasi tersebut digunakan untuk membandingkan kondisi aktual dengan nilai yang diinginkan sehingga sistem dapat melakukan koreksi apabila terjadi kesalahan posisi.

Pada penelitian ini, rotary encoder digunakan sebagai sensor umpan balik untuk mengukur panjang material yang bergerak menuju area pemotongan. Encoder dipasang pada poros roll penarik material sehingga setiap perputaran roll akan menghasilkan sejumlah pulsa yang sebanding dengan panjang material yang telah bergerak. Pulsa tersebut dibaca oleh PLC Mitsubishi FX3U melalui fitur High Speed Counter (HSC) dan dikonversi menjadi nilai panjang material dalam satuan milimeter [6],[1].

Penggunaan rotary encoder pada sistem ini sangat penting karena menentukan tingkat akurasi pengukuran panjang material. Semakin akurat pembacaan encoder, semakin tepat pula hasil pemotongan yang dihasilkan oleh mesin.



Gambar 2.5 Rotary Encoder Omron E6B2-CWZ6C

Tabel 2. 6 Data Rotary Encoder Omron E6B2-CWC6CR- 1000 ppr

Parameter	Spesifikasi
Model	Omron E6B2-CWC6C
Jenis Encoder	Incremental Rotary Encoder
Resolusi	1000 Pulse/Rotation (PPR)
Tegangan Kerja	5–24 VDC
Tipe Output	NPN Open Collector
Kanal Output	A, B, Z
Diameter Body	40 mm
Diameter Poros	6 mm
Kecepatan Maksimum	6000 rpm
Tingkat Proteksi	IP50
Aplikasi	Sistem kontrol posisi dan pengukuran panjang material

2.2.8.1 Pengertian Rotary Encoder

Rotary encoder adalah sensor elektromekanis yang berfungsi mengubah gerakan rotasi menjadi sinyal listrik digital. Sinyal digital yang dihasilkan berupa pulsa-pulsa yang dapat dihitung oleh mikrokontroler, PLC, atau sistem kontrol lainnya untuk menentukan posisi, arah putaran, dan kecepatan putaran suatu poros.

Encoder bekerja berdasarkan perubahan kondisi cahaya atau medan magnet yang terjadi saat piringan encoder berputar. Perubahan tersebut diterjemahkan menjadi sinyal digital berbentuk logika HIGH dan LOW yang kemudian dihitung sebagai pulsa [7].

Secara umum rotary encoder terdiri dari beberapa bagian utama yaitu:

1. Poros encoder (shaft)
2. Piringan encoder (encoder disk)
3. Sensor optik atau sensor magnetik
4. LED pemancar cahaya
5. Rangkaian pembangkit pulsa
6. Terminal keluaran sinyal

Ketika poros encoder berputar, piringan encoder ikut berputar sehingga sensor mendeteksi perubahan pola yang menghasilkan pulsa digital.

2.2.8.2 Jenis-Jenis Rotary Encoder

Secara umum rotary encoder dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu:

1. Encoder Inkremental (Incremental Encoder)

Encoder inkremental menghasilkan pulsa berdasarkan perubahan posisi putaran. Sensor ini hanya memberikan informasi perpindahan posisi relatif terhadap titik awal.

Karakteristik encoder inkremental:

- Menghasilkan pulsa selama poros berputar.
- Tidak menyimpan posisi absolut.
- Memerlukan referensi awal (homing).
- Harga relatif lebih murah.
- Banyak digunakan pada sistem kontrol industri.

Pada penelitian ini digunakan encoder inkremental karena memiliki biaya yang lebih ekonomis dan sangat sesuai untuk pengukuran panjang material.

2. Encoder Absolut (Absolute Encoder)

Encoder absolut menghasilkan kode digital unik untuk setiap posisi poros sehingga posisi dapat diketahui secara langsung tanpa memerlukan referensi awal. Karakteristik encoder absolut:

- Menyimpan posisi aktual.
- Tidak kehilangan data posisi saat listrik mati.
- Akurasi sangat tinggi.
- Harga lebih mahal dibanding encoder inkremental.

2.2.8.3 Prinsip Kerja Rotary Encoder Inkremental

Rotary encoder inkremental bekerja berdasarkan proses pembangkitan pulsa saat poros encoder berputar. Pada encoder optik, terdapat piringan

berlubang yang dipasang pada poros encoder. Di satu sisi terdapat LED pemancar cahaya dan di sisi lain terdapat sensor penerima cahaya [15],[7]. Ketika piringan berputar:

- Cahaya melewati lubang piringan.
- Sensor menerima cahaya.
- Sinyal berubah menjadi logika HIGH.

Saat bagian piringan yang tertutup melewati sensor:

- Cahaya terhalang.
- Sensor tidak menerima cahaya.
- Sinyal berubah menjadi logika LOW.

Perubahan HIGH dan LOW ini menghasilkan pulsa digital yang dapat dihitung oleh PLC. Semakin banyak putaran encoder, semakin banyak pulsa yang dihasilkan. Jumlah pulsa tersebut berbanding lurus dengan jarak pergerakan material yang diukur.

2.2.8.4 Kanal Output Encoder

Encoder inkremental umumnya memiliki tiga kanal keluaran yaitu:

1. Kanal A

Menghasilkan pulsa utama yang digunakan untuk menghitung jumlah putaran.

2. Kanal B

Menghasilkan pulsa yang memiliki pergeseran fasa 90° terhadap kanal A. Fungsi kanal B adalah untuk menentukan arah putaran encoder.

3. Kanal Z (Index)

Menghasilkan satu pulsa setiap satu putaran penuh encoder.

Kanal ini biasanya digunakan sebagai titik referensi atau homing.

Pada penelitian ini, kanal A digunakan sebagai sumber utama pembacaan pulsa oleh PLC Mitsubishi FX3U.

2.2.8.5 Pulse Per Revolution (PPR)

Salah satu parameter penting pada rotary encoder adalah Pulse Per Revolution (PPR). PPR menunjukkan jumlah pulsa yang dihasilkan encoder dalam satu putaran penuh poros. Secara matematis: **(rumus 2.3)**

PPR = Jumlah Pulsa Dalam 1 Putaran

Semakin besar nilai PPR, semakin tinggi resolusi encoder dan semakin akurat hasil pengukurannya.

Pada penelitian ini digunakan rotary encoder dengan spesifikasi:

PPR = 1000

Artinya

$$1 \text{ Putaran} = 1000 \text{ Pulsa}$$

Jika encoder berputar 2x maka :

$$\text{Pulsa} = 2 \times 1000 = 2000 \text{pls}$$

Semakin banyak jumlah pulsa yang dapat dibaca, semakin kecil perubahan posisi yang dapat dideteksi oleh sistem.

2.2.8 6 Resolusi Encoder

Resolusi encoder menunjukkan tingkat ketelitian pengukuran yang dapat dilakukan encoder. Resolusi dapat dihitung menggunakan persamaan:

Rumus (2.4)

$$\text{Resolusi} = \frac{\text{Keliling Gulir}}{Ppr}$$

$$1 \text{ Putaran} = 1000 \text{ Pulsa}$$

Diameter roll penarik material: 24,85mm

$$D = 24,85 \text{mm}$$

Keliling roll:

Rumus (2.5)

$$K = \pi \cdot D$$

$$K = 3,14 \times 24,85$$

$$K = 78 \text{mm}$$

Dengan encoder 1000 PPR:

$$\text{Resolusi} = \frac{78 \text{mm}}{1000} = 0,078 \text{mm/pulsa}$$

Artinya satu pulsa encoder mewakili perpindahan material sebesar 0,078 mm. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan pengukuran yang sangat baik untuk aplikasi mesin potong otomatis.

2.2.8.7 Perhitungan Panjang Material Menggunakan Encoder

Panjang material yang bergerak dapat dihitung berdasarkan jumlah pulsa encoder yang terbaca PLC. Persamaan yang digunakan adalah:

Rumus (2.6)

$$\text{Panjang} = \frac{\text{Pulsa Terbaca}}{Ppr} \times \text{Keliling OD Roll}$$

Keterangan:

Panjang = Panjang material (mm)

Pulsa Terbaca = Jumlah pulsa encoder

PPR = Pulse Per Revolution

Keliling OD Roll = Keliling roda penggerak (mm)

Contoh:

Pulsa terbaca = 1000 pls
Resolusi Rotary encoder = 1000Ppr
Keliling roll = 78mm
Maka:

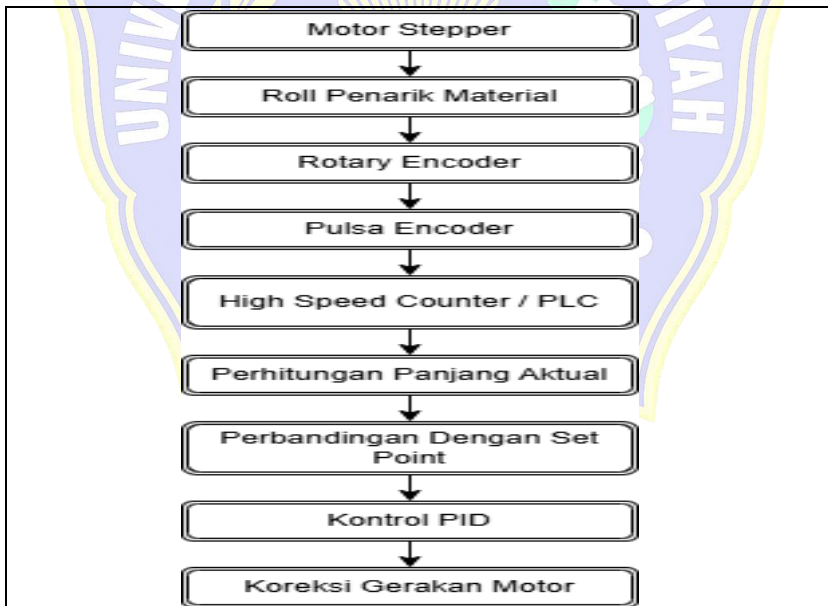
$$Panjang = \frac{1000}{1000} \times 78 = 78mm$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa panjang material yang telah bergerak mendekati 78 mm.

2.2.8.8 Rotary Encoder Sebagai Sensor (Feedback Sensor)

Dalam sistem kontrol posisi, rotary encoder berfungsi sebagai sensor umpan balik yang memberikan informasi kondisi aktual sistem kepada PLC. Pada penelitian ini, encoder dipasang pada poros roll penarik material. Ketika motor stepper memutar roll, encoder akan menghasilkan pulsa yang sebanding dengan panjang material yang bergerak.

Alur kerja sistem umpan balik dapat dijelaskan sebagai berikut:



PLC akan membandingkan panjang aktual hasil pembacaan encoder dengan set point yang dimasukkan melalui HMI. Selisih antara keduanya disebut error: **(rumus 2.7)**

Error = Setpoint – Kesalahan

Nilai error tersebut digunakan oleh algoritma PID untuk menghasilkan sinyal koreksi sehingga panjang material yang diukur dapat mendekati nilai yang diinginkan.

2.2.8.9 Keunggulan Rotary Encoder pada Sistem Mesin Potong

Penggunaan rotary encoder pada penelitian ini memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

1. Memiliki akurasi pengukuran yang tinggi.
2. Mampu memberikan data posisi secara real-time.
3. Kompatibel dengan High Speed Counter PLC Mitsubishi FX3U.
4. Mampu mendeteksi perubahan panjang material dengan cepat.
5. Mendukung sistem kontrol loop tertutup (closed loop).
6. Meningkatkan ketelitian hasil pemotongan material.
7. Mengurangi kesalahan pengukuran akibat slip atau faktor mekanis lainnya.

Berdasarkan fungsi dan karakteristik tersebut, rotary encoder menjadi komponen yang sangat penting dalam prototype sistem kontrol mesin potong berbasis PLC Mitsubishi dan metode PID kontrol posisi. Encoder berperan sebagai sensor umpan balik yang menyediakan informasi panjang aktual material secara real-time sehingga PLC dapat melakukan koreksi posisi secara akurat dan menghasilkan proses pemotongan yang presisi sesuai set point yang ditentukan operator.

2.2.9 Sensor Proximity

Sensor proximity merupakan salah satu jenis sensor industri yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek tanpa harus terjadi kontak fisik antara sensor dan objek yang dideteksi. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan perubahan medan elektromagnetik yang terjadi ketika suatu benda berada dalam jarak deteksi sensor. Karena tidak memerlukan kontak langsung, sensor proximity memiliki umur pakai yang lebih panjang dibandingkan sakelar mekanis serta lebih tahan terhadap debu, getaran, dan lingkungan industri yang keras.

Dalam sistem otomasi industri, sensor proximity banyak digunakan sebagai sensor posisi, sensor batas gerak (limit sensor), sensor penghitung benda, sensor pendeteksi keberadaan material, dan sensor referensi awal (home position). Kemampuan sensor dalam mendeteksi objek secara cepat

dan akurat menjadikannya komponen penting dalam berbagai sistem kontrol otomatis.

Pada penelitian ini digunakan sensor proximity tipe TL-Q5MC1 sebagai sensor pendeteksi posisi awal (home position) dan batas gerak sistem. Sensor ini terhubung ke input PLC Mitsubishi FX3U sehingga setiap perubahan kondisi sensor dapat langsung diproses oleh sistem kontrol. Informasi dari sensor proximity digunakan untuk memastikan posisi awal mekanisme penarik material serta mencegah pergerakan yang melebihi batas yang telah ditentukan [17],[8].



Gambar 2.6 Proximity Sensor TL-Q5MC1

2.2.9.1 Pengertian Sensor Proximity

Sensor proximity adalah sensor elektronik yang mampu mendeteksi keberadaan suatu objek pada jarak tertentu tanpa kontak fisik. Ketika objek memasuki area deteksi sensor, keluaran sensor akan berubah dari kondisi OFF menjadi ON atau sebaliknya. Pada umumnya sensor proximity menghasilkan sinyal digital berupa logika:

- Logika 0 (OFF)
- Logika 1 (ON)

Sinyal tersebut kemudian dibaca oleh PLC sebagai masukan (input) untuk menjalankan fungsi kontrol tertentu. Keunggulan utama sensor proximity dibandingkan sakelar mekanik adalah tidak adanya komponen yang saling bergesekan sehingga tingkat keausan sangat rendah dan keandalan sistem menjadi lebih tinggi.

2.2.9.2 Prinsip Kerja Sensor Proximity

Prinsip kerja sensor proximity bergantung pada jenis sensor yang digunakan. Pada sensor proximity induktif seperti TL-Q5MC1, proses pendeteksian dilakukan dengan memanfaatkan medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh kumparan internal sensor.

Saat sensor diberi catu daya, rangkaian osilator di dalam sensor menghasilkan medan elektromagnetik pada bagian muka sensor. Ketika benda logam mendekati area deteksi, medan elektromagnetik tersebut akan mengalami perubahan akibat munculnya arus eddy (eddy current) pada permukaan logam.

Perubahan ini menyebabkan amplitudo osilator menurun dan dideteksi oleh rangkaian internal sensor. Selanjutnya sensor akan mengubah kondisi output menjadi ON sehingga PLC dapat mengetahui bahwa terdapat objek pada area deteksi.

Proses kerja sensor dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Sensor diberi tegangan 24 VDC.
2. Sensor menghasilkan medan elektromagnetik.
3. Objek logam memasuki area deteksi.
4. Medan elektromagnetik berubah.
5. Rangkaian sensor mendeteksi perubahan tersebut.
6. Output sensor berubah menjadi ON.
7. PLC menerima sinyal sebagai input sistem.

Karena proses deteksi dilakukan tanpa kontak fisik, sensor mampu bekerja dengan respon yang sangat cepat dan stabil.

2.2.9.3 Sensor Proximity TL-Q5MC1

Sensor TL-Q5MC1 merupakan sensor proximity induktif yang banyak digunakan dalam sistem otomasi industri. Sensor ini memiliki ukuran yang relatif kecil, pemasangan yang mudah, serta kompatibel dengan sistem kontrol berbasis PLC. Sensor ini dirancang untuk mendeteksi keberadaan benda logam pada jarak tertentu dengan tingkat keandalan yang tinggi. Spesifikasi umum sensor TL-Q5MC1 ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.7 Spesifikasi Sensor Proximity TL-Q5MC1

Parameter	Nilai
Tipe Sensor	Induktif
Model	TL-Q5MC1
Tegangan Kerja	10 – 30 VDC
Tegangan Operasi Sistem	24 VDC

Jarak Deteksi	5 mm
Jenis Output	NPN Normally Open (NO)
Frekuensi Respon	± 500 Hz
Indikator	LED
Material Terdeteksi	Logam
Tingkat Proteksi	IP67

Dengan jarak deteksi sekitar 5 mm, sensor mampu mendeteksi posisi benda logam secara akurat dan konsisten.

2.2.9.4 Konfigurasi Kabel Sensor TL-Q5MC1

Sensor TL-Q5MC1 umumnya memiliki tiga kabel utama.

Warna Kabel	Fungsi
Coklat	+24 VDC
Biru	Ground (0 V)
Hitam	Output Sensor

Hubungan sensor dengan PLC Mitsubishi FX3U dapat dilakukan sebagai berikut:

Sensor	PLC FX3U
Coklat	+24 VDC
Biru	COM Input
Hitam	X6 atau X7

Pada penelitian ini sensor ditempatkan pada input X6 dan X7 untuk mendeteksi posisi tertentu pada mekanisme mesin potong.

2.2.9.5 Sensor Proximity Sebagai Sensor Posisi (Home Position)

Salah satu fungsi utama sensor proximity pada penelitian ini adalah sebagai pendeteksi posisi awal sistem. Saat mesin pertama kali dinyalakan, posisi mekanisme penarik material belum tentu berada pada titik referensi yang benar. Oleh karena itu dilakukan proses homing.

Proses homing berlangsung sebagai berikut:

1. Motor stepper bergerak menuju posisi referensi.
2. Sensor proximity mendeteksi plat logam referensi.
3. Output sensor berubah menjadi ON.
4. PLC menghentikan motor stepper.

5. Posisi tersebut ditetapkan sebagai titik nol sistem.

Dengan adanya proses homing, setiap proses pengukuran panjang dimulai dari posisi referensi yang sama sehingga akurasi sistem dapat dipertahankan.

2.2.9.6 Sensor Proximity Sebagai Batas Gerak Sistem

Selain sebagai sensor home position, TL-Q5MC1 juga digunakan sebagai sensor pembatas gerak (limit sensor).

Fungsi limit sensor antara lain:

- Mencegah motor bergerak melewati batas mekanis.
- Mengurangi risiko kerusakan komponen.
- Meningkatkan keamanan sistem.
- Menghindari benturan mekanis.

Ketika sensor mendeteksi bahwa mekanisme telah mencapai batas tertentu, PLC akan menghentikan motor stepper atau mengubah arah gerakan sesuai program yang telah dibuat.

2.2.9.7 Integrasi Sensor Proximity dengan PLC

Pada penelitian ini sensor proximity dihubungkan langsung ke input PLC Mitsubishi FX3U. Alur kerjanya adalah sebagai berikut:

Sensor Proximity TL-Q5MC1 → Input PLC (X6 dan X7) → Program Ladder PLC → Keputusan Kontrol → Motor Stepper dan Sistem Pemotongan

PLC secara terus-menerus membaca status sensor melalui proses scan cycle. Ketika sensor aktif, PLC akan menjalankan instruksi yang telah diprogram, seperti menghentikan motor, mengatur ulang posisi, atau mengaktifkan proses pemotongan.

2.2.9.8 Keunggulan Sensor Proximity TL-Q5MC1 pada Sistem

Penggunaan sensor proximity TL-Q5MC1 pada penelitian ini memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

1. Mendeteksi posisi tanpa kontak fisik.
2. Respon deteksi sangat cepat.
3. Tahan terhadap debu dan getaran industri.
4. Memiliki umur pakai yang panjang.
5. Mudah diintegrasikan dengan PLC Mitsubishi FX3U.
6. Meningkatkan keamanan sistem.
7. Menjamin proses homing berjalan dengan akurat.
8. Mencegah kerusakan akibat pergerakan yang melebihi batas mekanis.

Berdasarkan karakteristik tersebut, sensor proximity TL-Q5MC1 sangat sesuai digunakan sebagai sensor posisi awal dan sensor batas gerak pada prototype sistem kontrol mesin potong berbasis PLC Mitsubishi dan HMI dengan metode PID kontrol posisi. Sensor ini membantu PLC memperoleh informasi posisi secara akurat sehingga sistem dapat bekerja lebih aman, stabil, dan presisi selama proses pengukuran serta pemotongan material berlangsung.

2.2.10 Catu Daya 24 VDC

Catu daya (power supply) merupakan perangkat yang berfungsi mengubah sumber tegangan listrik AC menjadi tegangan DC yang stabil sesuai kebutuhan sistem kontrol. Dalam sistem otomasi industri, catu daya sangat penting karena seluruh komponen elektronik memerlukan sumber tegangan yang stabil agar dapat bekerja dengan baik dan aman.

Pada penelitian ini digunakan catu daya 24 VDC sebagai sumber energi utama untuk mengoperasikan PLC Mitsubishi FX3U, HMI Weintek MT6071iP, sensor proximity TL-Q5MC1, driver motor stepper TB6600, serta komponen pendukung lainnya. Tegangan 24 VDC dipilih karena merupakan standar tegangan yang umum digunakan pada sistem otomasi industri, memiliki tingkat keamanan yang baik, serta kompatibel dengan sebagian besar perangkat kontrol industri.

Prinsip kerja catu daya dimulai dengan mengubah tegangan AC dari jaringan listrik menjadi tegangan DC melalui proses penyearahan, penyaringan, dan pengaturan tegangan. Hasil keluaran berupa tegangan DC yang stabil digunakan untuk mensuplai seluruh komponen sistem agar dapat bekerja secara optimal.

Pada prototype mesin potong yang dirancang, catu daya 24 VDC memiliki beberapa fungsi utama, yaitu:

1. Menyediakan tegangan kerja untuk PLC Mitsubishi FX3U.
2. Menyuplai daya ke HMI Weintek MT6071iP.
3. Memberikan tegangan operasi pada sensor proximity TL-Q5MC1.
4. Menyediakan sumber daya bagi driver motor stepper TB6600.
5. Menjaga kestabilan operasi seluruh sistem kontrol.

Penggunaan catu daya yang stabil sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem. Tegangan yang tidak stabil dapat menyebabkan gangguan komunikasi antara PLC dan HMI, kesalahan pembacaan sensor, bahkan kegagalan operasi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, pemilihan catu daya 24 VDC yang sesuai menjadi salah satu faktor penting dalam

mendukung keandalan dan kestabilan prototype sistem kontrol mesin potong berbasis PLC Mitsubishi dan HMI dengan metode PID kontrol posisi.



Gambar 2.7 Power supply input 220volt AC, output 24volt DC

Tabel 2 .8 Datasheet Power Supply 24 VDC Omron S8VM-15024C

Parameter	Spesifikasi
Model	Omron S8VM-15024C
Jenis	Switching Power Supply
Tegangan Masukan	100–240 VAC, 50/60 Hz
Tegangan Keluaran	24 VDC
Arus Keluaran	6,5 A
Daya Keluaran	150 W
Efisiensi	Hingga 88%
Proteksi	Overload, Overvoltage, Short Circuit
Metode Pemasangan	DIN Rail
Suhu Operasi	–10°C hingga +60°C
Aplikasi	Catu daya untuk PLC, HMI, sensor, dan sistem otomasi

2.2.11 PID

2.2.11.1 Pengendali PID (Proportional Integral Derivative)

Pengendali PID (Proportional Integral Derivative) merupakan salah satu metode kontrol yang paling banyak digunakan dalam sistem otomasi industri karena memiliki kemampuan menghasilkan respon sistem yang cepat, stabil, dan akurat. PID bekerja dengan cara membandingkan nilai keluaran aktual sistem (process variable) dengan nilai yang diinginkan (set point). Selisih antara kedua nilai tersebut disebut error yang kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan sinyal kontrol.

Pada penelitian ini, metode PID digunakan untuk mengontrol posisi panjang material yang diukur menggunakan rotary encoder. PLC Mitsubishi FX3U membandingkan panjang aktual material dengan panjang target yang dimasukkan melalui HMI. Apabila terjadi selisih antara keduanya, maka pengendali PID akan menghasilkan sinyal koreksi untuk mengatur pergerakan motor stepper hingga panjang material mendekati nilai set point [4],[5].

Secara matematis, persamaan PID dapat dituliskan sebagai berikut: **(rumus 2.8)**

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Keterangan:

- $U(t)$ = sinyal keluaran kontrol
- $e(t)$ = error
- K_p = konstanta proporsional
- K_i = konstanta integral
- K_d = konstanta derivatif

Pengendali PID terdiri dari tiga komponen utama, yaitu Proportional (P), Integral (I), dan Derivative (D).

1. Kontrol Proporsional (Proportional)

Kontrol proporsional menghasilkan sinyal keluaran yang besarnya sebanding dengan nilai error yang terjadi. Semakin besar error, semakin besar pula aksi kontrol yang diberikan sistem.

Persamaan kontrol proporsional: **(Rumus 2.9)**

$$P(t) = K_p \times e(t)$$

Nilai (K_p) berfungsi mempercepat respon sistem menuju set point.

Pengaruh peningkatan nilai K_p :

- Mempercepat respon sistem.
- Mengurangi rise time.

- Mengurangi error sementara.
- Dapat menyebabkan overshoot apabila terlalu besar.

Pada sistem mesin potong, bagian proporsional berfungsi mempercepat pergerakan motor stepper saat panjang aktual masih jauh dari panjang target.

2. Kontrol Integral (Integral)

Kontrol integral berfungsi menghilangkan kesalahan tetap (steady state error) yang tidak dapat dihilangkan oleh kontrol proporsional.

Persamaan kontrol integral: **(Rumus 2.10)**

$$D_i = K \int e(t) \cdot dt$$

Bagian integral akan mengakumulasi error yang terjadi dari waktu ke waktu sehingga sistem dapat mencapai nilai set point secara lebih tepat.

Pengaruh peningkatan nilai K_i :

- Menghilangkan steady state error.
- Meningkatkan akurasi sistem.
- Mempercepat pencapaian set point.
- Dapat menyebabkan osilasi apabila terlalu besar.

Pada penelitian ini, kontrol integral membantu memastikan panjang hasil pemotongan benar-benar mendekati nilai yang ditentukan operator.

3. Kontrol Derivatif (Derivative)

Kontrol derivatif bekerja berdasarkan laju perubahan error terhadap waktu. Persamaan kontrol derivatif: **(Rumus 2.11)**

$$D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Bagian derivatif berfungsi memprediksi arah perubahan error sehingga mampu mengurangi overshoot dan meningkatkan kestabilan sistem.

Pengaruh peningkatan nilai K_d :

- Mengurangi overshoot.
- Mengurangi osilasi.
- Meningkatkan kestabilan sistem.
- Memperlambat respon apabila nilainya terlalu besar.

Pada sistem mesin potong, kontrol derivatif membantu memperhalus pergerakan motor stepper ketika panjang aktual mendekati set point sehingga pemotongan dapat dilakukan dengan lebih presisi.

2.2.11.2 Prinsip Kerja PID pada Sistem Mesin Potong

Pada penelitian ini proses kontrol PID berlangsung melalui tahapan berikut:

1. Operator memasukkan panjang potong melalui HMI.

2. PLC menerima nilai set point.
3. Motor stepper mulai menarik material.
4. Rotary encoder membaca panjang aktual material.
5. PLC menghitung error antara set point dan panjang aktual.
6. Pengendali PID mengolah nilai error.
7. PLC menghasilkan koreksi berupa perubahan jumlah pulsa atau kecepatan motor.
8. Motor stepper bergerak sesuai hasil koreksi.
9. Proses berlangsung hingga error mendekati nol.
10. Ketika panjang aktual telah mencapai set point, proses pemotongan dilakukan.

Dengan metode ini, sistem mampu menghasilkan panjang potong yang lebih akurat dibandingkan metode kontrol tanpa umpan balik.

2.2.11.3 Metode Penalaan PID Ziegler-Nichols

Penentuan parameter PID yang tepat sangat mempengaruhi performa sistem kontrol. Nilai K_p , K_i , dan K_d yang terlalu kecil dapat menyebabkan respon lambat, sedangkan nilai yang terlalu besar dapat menyebabkan osilasi dan ketidakstabilan sistem. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk menentukan parameter PID adalah metode Ziegler-Nichols yang diperkenalkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols pada tahun 1942. Metode ini digunakan untuk memperoleh parameter PID berdasarkan karakteristik osilasi sistem Metode Ziegler-Nichols [4].

Metode Ziegler-Nichols tipe osilasi dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. Nilai K_i dan K_d diatur menjadi nol.

$$K_i = 0$$

$$K_d = 0$$
2. Nilai konstanta proporsional (K_p) kemudian dinaikkan secara bertahap melalui simulasi hingga sistem menghasilkan osilasi kontinu (*sustained oscillation*). Respon sistem diamati menggunakan grafik *step response* pada MATLAB. Berdasarkan hasil simulasi, sistem mulai menunjukkan osilasi kontinu pada K_p .
3. Sehingga nilai K_p tersebut ditetapkan sebagai **Ultimate Gain (K_u)**, yaitu nilai penguatan proporsional saat sistem berada pada batas kestabilan..
4. Selanjutnya, periode osilasi ditentukan dengan mengukur selang waktu antara dua puncak berturut-turut pada grafik respon simulasi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa periode satu siklus osilasi P_u .

5. Nilai **Ultimate Gain (Ku)** dan **Ultimate Period (Pu)** tersebut kemudian digunakan untuk menghitung parameter pengendali PID berdasarkan aturan penalaan Ziegler-Nichols.

Tabel 2. 9 Penalaan Ziegler-Nichols

Jenis Kontrol	Kp	Ti	Td
P	0,5 Ku	-	-
PI	0,45 Ku	Pu/1,2	-
PID	0,6 Ku	Pu/2	Pu/8

(Rumus 2.12)

Parameter PID kemudian dihitung menggunakan:

$$Kp = 0,6 . K u$$

$$K = \frac{Kp}{T}$$

$$Kd = Kp \times Td$$

2.2.11.4 Keunggulan Metode Ziegler-Nichols

Metode Ziegler-Nichols memiliki beberapa kelebihan, yaitu:

1. Proses penalaan relatif sederhana.
2. Tidak memerlukan model matematis sistem.
3. Mudah diterapkan pada sistem industri.
4. Mampu menghasilkan parameter awal PID dengan cepat.
5. Banyak digunakan pada sistem kontrol posisi dan kecepatan.

Pada penelitian ini, metode Ziegler-Nichols digunakan untuk menentukan parameter awal PID pada sistem kontrol posisi mesin potong berbasis PLC Mitsubishi FX3U. Parameter yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar pengaturan kontrol motor stepper sehingga sistem mampu menghasilkan panjang potong yang akurat, stabil, dan memiliki kesalahan pengukuran yang kecil.

2.2.12 Persamaan Matematis Sistem Orde 2 Motor Stepper NEMA 23

Motor stepper NEMA 23 pada sistem pengumpan (feeding) material dapat dimodelkan sebagai sistem orde dua karena memiliki karakteristik inersia mekanik dan redaman yang memengaruhi respons posisi maupun kecepatan. Model orde dua digunakan untuk menganalisis kestabilan sistem, waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), serta respons terhadap perubahan set point [13].

Secara umum, persamaan diferensial sistem orde dua dituliskan sebagai:

(Rumus 2.13)

$$\frac{D^2 y(t)}{dt^2} + 2 \zeta \omega N \frac{dy(t)}{dt} + \omega^2 N^2 y(t) = \omega^2 N^2 u(t)$$

Keterangan:

- $y(t)$ = keluaran sistem (posisi motor)
- $u(t)$ = masukan sistem
- ωN (ωN) = frekuensi alami (*natural frequency*)
- ζ (zeta) = rasio redaman (*damping ratio*)

Persamaan transfer fungsi sistem orde dua adalah: (Rumus 2.14)

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega^2 N^2}{s^2 + 2 \zeta \omega N s + \omega^2 N^2}$$

Pada motor stepper NEMA 23, parameter inersia rotor dan beban yang digerakkan menghasilkan komponen orde kedua. Model mekanik motor dapat dituliskan sebagai:

(Rumus 2.15)

$$J \frac{D^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = T(t)$$

dengan:

- J = momen inersia rotor dan beban ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
- B = koefisien redaman atau gesekan ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$)
- θ ($\theta(t)$) = sudut putaran motor (rad)
- $T(t)$ = torsi motor ($\text{N} \cdot \text{m}$)

Jika sistem dikendalikan menggunakan PID dan dihubungkan dengan mekanisme rol pengukur panjang material, maka perubahan posisi motor akan memengaruhi panjang material yang terbaca oleh rotary encoder. Oleh karena itu, model orde dua digunakan sebagai dasar analisis respons sistem terhadap perubahan set point panjang pemotongan.

Nilai rasio redaman (ζ) menentukan karakteristik respons sistem, yaitu:

- ($\zeta < 1$) : sistem *underdamped* (terjadi osilasi).
- ($\zeta = 1$) : sistem *critically damped* (cepat mencapai set point tanpa osilasi).
- ($\zeta > 1$) : sistem *overdamped* (respons lebih lambat namun stabil).

Dalam penelitian ini, model orde dua digunakan untuk menggambarkan dinamika motor stepper NEMA 23 sehingga proses penalaan parameter PID dapat dilakukan untuk memperoleh respons yang cepat, stabil, dan akurat sesuai panjang material yang ditentukan.

Model matematis sistem motor stepper dinyatakan sebagai sistem orde dua dengan fungsi alih:

(Rumus 2.16)

$$G(s) = \frac{\omega^2 N}{s^2 + 2 \text{ detik} + \omega^2 N}$$

Keterangan:

- ω_n = frekuensi alami (Natural Frequency)
- ζ = rasio redaman (Damping Ratio)

Fungsi alih tersebut digunakan untuk menggambarkan hubungan antara sinyal masukan (*input*) dan keluaran (*output*) motor stepper pada *dokeuntungan*) sisalami *fr* dan rasio redamarasio redaman). Model ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk melakukan simulasi di MATLAB serta proses penalaan parameter.

