

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Pengembangan sistem *Coil winding* atau *Coil winder* merupakan topik yang banyak diteliti, khususnya dalam bidang manufaktur mesin listrik seperti transformator dan motor listrik. Sistem *Coil winding* yang baik harus mampu menghasilkan lilitan yang presisi, merata, serta memiliki tingkat kesalahan yang rendah agar kualitas produk tetap terjaga. Oleh karena itu, sebelum melakukan perancangan dan pengembangan sistem *Coil winder* dalam Tugas Akhir ini, penting untuk meninjau penelitian-penelitian terdahulu yang relevan. Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk memahami pendekatan, metode, serta keterbatasan dari penelitian sebelumnya sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan arah dan pengembangan penelitian yang akan dilakukan.

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jian Luo, Pengbin Cao, Baocheng Yu, Min Zhang, dan Wenxia Xu pada jurnal IEEE dengan judul "*The Coil Auto-lifting System of Intelligent Winding Machine*", dijelaskan bahwa proses pembuatan *Coil* pada industri transformator secara konvensional masih banyak mengandalkan proses manual dan semi-otomatis, yang berpotensi menimbulkan ketidakkonsistenan kualitas lilitan. Penelitian ini mengusulkan sebuah *intelligent winding machine* yang mampu melakukan proses *winding* dan pengangkatan lapisan *Coil (up-layering)* secara otomatis menggunakan mekanisme multi-axis synchronous dan bantuan lengan robot SCARA. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan algoritma kompensasi error yang mampu menurunkan nilai kesalahan hingga sekitar 90% serta meningkatkan produktivitas lebih dari tiga kali lipat dibandingkan metode konvensional. Namun, sistem yang dikembangkan masih berfokus pada skala industri besar dan memiliki kompleksitas mekanik yang tinggi sehingga kurang sesuai untuk implementasi sederhana atau skala laboratorium. [5]

2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh peneliti dalam jurnal IEEE berjudul “*Active Real-Time Tension Control for Coil Winding Machine of BLDC Motors*”, dijelaskan bahwa salah satu faktor penting dalam proses *Coil winding* adalah pengendalian tegangan kawat (*wire tension*) secara real-time. Penelitian ini menekankan bahwa fluktuasi tegangan kawat selama proses *winding* dapat menyebabkan ketidakteraturan distribusi lilitan dan menurunkan kualitas *Coil*. Sistem yang diusulkan menggunakan sensor dan mekanisme kontrol aktif untuk menjaga tegangan kawat tetap stabil selama proses *winding* berlangsung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol tegangan *real-time* mampu meningkatkan konsistensi lilitan dan mengurangi cacat pada *Coil*. Meskipun demikian, penelitian ini lebih menitikberatkan pada aspek kontrol tegangan dan belum membahas secara mendalam pengaturan jumlah lilitan, kerapatan *Coil*, maupun antarmuka pengguna. [6]
3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan dalam jurnal IEEE dengan judul “*The Role of Test Methods and Specifications in Coil Winding*”, dijelaskan bahwa kualitas hasil *Coil winding* sangat dipengaruhi oleh metode pengujian dan spesifikasi teknis yang digunakan selama proses produksi. Penelitian ini menyoroti pentingnya standar pengujian untuk memastikan keseragaman dimensi, kerapatan lilitan, serta ketahanan mekanik *Coil*. Selain itu, penelitian ini juga menjelaskan bahwa kesalahan kecil pada proses *winding* dapat terakumulasi dan berdampak signifikan pada performa akhir *Coil*. Namun, penelitian ini lebih bersifat analitis dan evaluatif, serta belum mengusulkan sebuah sistem atau mesin *Coil winder* yang terintegrasi secara langsung. [3]

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu tersebut, masih terdapat beberapa keterbatasan yang dapat dijadikan peluang pengembangan dalam Tugas Akhir ini. Beberapa penelitian sebelumnya memiliki kompleksitas sistem yang tinggi dan ditujukan untuk industri berskala besar, sementara penelitian lainnya hanya berfokus pada aspek tertentu seperti kontrol tegangan atau metode pengujian tanpa integrasi sistem secara menyeluruh. Oleh karena itu, penulis berinisiatif untuk

mengembangkan sebuah sistem *Coil winder* yang lebih sederhana, terintegrasi, dan dapat dikendalikan secara otomatis, dengan fokus pada pengaturan jumlah lilitan, kerapatan *Coil*, serta akurasi pergerakan motor. Sistem yang dikembangkan diharapkan dapat menjadi solusi yang lebih aplikatif untuk skala pendidikan, laboratorium, maupun pengembangan lebih lanjut pada tingkat industri.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 *Coil* (Kumparan)



**Gambar 2- 1** Coppper Coil

*Coil* atau kumparan merupakan elemen pasif dalam sistem elektromagnetik yang tersusun dari kawat penghantar yang dililitkan secara berulang sehingga membentuk struktur berlapis atau spiral. Fungsi utama *Coil* adalah menghasilkan medan magnet ketika arus listrik mengalir melaluinya. Fenomena ini terjadi karena setiap lilitan kawat menghasilkan garis-garis gaya magnet yang saling memperkuat satu sama lain, sehingga menghasilkan medan magnet total yang lebih besar dibandingkan satu kawat lurus. Karakteristik dasar *Coil* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jumlah lilitan, diameter kawat, jarak antar lilitan, serta bentuk geometrinya. *Coil winder* dapat dilihat pada gambar 2-1.

Induktansi merupakan parameter paling penting dari sebuah *Coil*. Induktansi menggambarkan kemampuan *Coil* untuk menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Nilai induktansi bergantung pada konfigurasi lilitan, jarak lilitan satu sama lain, luas penampang *Coil*, serta keberadaan inti magnetis di dalamnya. Studi Yuhua

Cheng dan Yaming Shu menunjukkan bahwa bentuk spiral atau konfigurasi planar pada *Coil* memengaruhi distribusi fluks magnetik dan menentukan seberapa besar energi magnetik dapat disimpan secara efisien di dalam struktur *Coil* [8]. Dengan demikian, perubahan kecil pada geometri *Coil* dapat memberikan perubahan signifikan pada nilai induktansi.

Selain induktansi diri (*self-inductance*), *Coil* juga memiliki sifat mutual inductance, yaitu kemampuan sebuah *Coil* untuk menginduksikan tegangan pada *Coil* lain yang berada di dekatnya akibat perubahan medan magnet. Mutual inductance sangat dipengaruhi oleh jarak antara kedua *Coil*, orientasi, dan konfigurasi geometrinya. Menurut A New Analytical Calculation of the Mutual Inductance of the Coaxial Spiral Rectangular Coils, struktur spiral pada *Coil* meningkatkan interaksi medan magnet antar *Coil*, sehingga mempermudah proses perhitungan *mutual inductance* pada sistem yang menggunakan lebih dari satu kumparan. Fenomena ini menjadi dasar dari berbagai aplikasi seperti transformator, resonator, dan sistem transmisi daya nirkabel [8].

Distribusi arus pada *Coil* juga berperan penting dalam membentuk kualitas medan magnet. Arus yang mengalir secara seragam menghasilkan medan magnet yang stabil, sedangkan penyimpangan distribusi arus dapat menyebabkan ketidakteraturan medan magnet. Pada *Coil* dengan bentuk spiral atau lilitan berlapis, distribusi arus cenderung tidak merata karena adanya resistansi kawat yang bervariasi tergantung panjang lintasan. Hal ini sering menjadi perhatian dalam analisis akurasi medan magnet serta dalam perancangan *Coil* presisi pada perangkat elektronik.

Kerapatan lilitan atau *winding density* merupakan aspek penting lain dalam pembentukan karakteristik *Coil*. *Coil* yang dililit dengan rapat menghasilkan gaya induksi yang lebih kuat karena medan magnet antar lilitan lebih saling memperkuat. Sebaliknya, lilitan yang renggang menyebabkan berkurangnya interaksi antar medan magnet sehingga mengurangi nilai induktansi dan kestabilan medan magnet yang dihasilkan. Kerapatan lilitan yang tidak konsisten juga dapat menyebabkan

pembentukan *hotspot* akibat distribusi arus yang tidak merata, memengaruhi efisiensi dan usia pakai *Coil*.

Secara keseluruhan, *Coil* adalah komponen fundamental dalam sistem elektromagnetik yang memiliki berbagai parameter penting seperti induktansi diri, *mutual inductance*, resistansi, dan distribusi medan magnet. Pemahaman mendalam terhadap parameter-parameter ini sangat diperlukan untuk merancang perangkat berbasis *Coil*, termasuk mesin *Coil winder* otomatis. Dengan mengetahui bagaimana geometri lilitan memengaruhi sifat elektromagnetik, proses perancangan *Coil* dapat dilakukan dengan lebih presisi, stabil, dan sesuai dengan kebutuhan sistem.

### 2.2.2 *Coil Winder*

*Coil winder* merupakan sebuah mesin yang dirancang untuk melakukan proses penggulungan kawat (*winding*) secara teratur pada suatu inti atau bobbin. Mesin ini menggantikan proses manual yang sering bergantung pada ketelitian operator dan rentan terhadap kesalahan jumlah lilitan, ketidakteraturan gulungan, serta kurangnya konsistensi antara satu produk dengan lainnya. Fungsi utama *Coil winder* adalah memastikan proses penggulungan berlangsung secara presisi sesuai parameter yang ditentukan, seperti jumlah lilitan, kecepatan gulungan, dan pola penggulungan. Dengan hadirnya *Coil winder*, kualitas kumparan dapat ditingkatkan secara signifikan dalam konteks produksi skala kecil hingga menengah. *Coil winder* manual seperti pada gambar 2-2 berikut.



**Gambar 2- 2** Mesin Coil Winding Manual

Mesin *Coil winder* bekerja berdasarkan prinsip menggerakkan inti *Coil* dan kawat secara terkoordinasi untuk menghasilkan pola gulungan yang rapi dan presisi. Pada sistem otomatis, motor stepper digunakan untuk mengontrol rotasi inti *Coil*, sedangkan mekanisme linear digunakan untuk mengatur pergeseran lateral kawat agar distribusi lilitan merata. Kecepatan motor, langkah gerak, dan sinkronisasi antar-mekanisme dikendalikan oleh mikrokontroler sehingga mesin dapat menghasilkan jumlah lilitan yang tepat serta menjaga pola *winding* tetap teratur. Kontrol elektronik juga memungkinkan proses berhenti otomatis saat jumlah lilitan telah mencapai nilai yang ditentukan, sehingga mengurangi risiko kelebihan atau kekurangan lilitan.

*Coil winder* dapat diklasifikasikan berdasarkan tingkat otomatisasi dan jenis aplikasinya. Pada tingkat paling sederhana, terdapat mesin *Coil winder* manual yang membutuhkan operator untuk memutar gagang dan mengatur arah kawat secara langsung. Mesin semi-otomatis menggunakan motor listrik untuk menggantikan putaran manual tetapi pengaturan lateral kawat masih dilakukan oleh operator. Sementara itu, *Coil winder* otomatis mengintegrasikan mikrokontroler, motor stepper, driver motor, dan sensor untuk mengatur seluruh proses *winding* tanpa intervensi manusia. Pada industri yang membutuhkan presisi tinggi, seperti produksi transformator kecil, motor brushless, atau kumpulan sensor, digunakan *Coil winder* berbasis CNC yang mampu mengatur pola *winding* kompleks sesuai parameter yang diprogram.

### **2.2.3 Mikrokontroler**

Mikrokontroler merupakan suatu sistem komputasi terintegrasi yang terdiri dari unit pemroses pusat (CPU), memori, serta perangkat input dan *output* dalam satu *chip*. Mikrokontroler banyak digunakan dalam sistem otomasi karena kemampuannya dalam mengendalikan proses secara real-time, berinteraksi dengan sensor dan aktuator, serta menjalankan algoritma kendali yang terprogram dengan konsumsi daya yang relatif rendah [9].

Dalam sistem otomasi mesin, mikrokontroler berperan sebagai pusat pengendali yang mengoordinasikan seluruh komponen sistem, seperti motor, sensor, dan

antarmuka pengguna. The Study Of Microcontroller Based Embedded System For Smart Lighting Applications menunjukkan bahwa penggunaan mikrokontroler pada mesin otomatis mampu meningkatkan konsistensi operasi, mengurangi ketergantungan terhadap operator, serta memungkinkan pengaturan parameter kerja secara fleksibel melalui perangkat lunak [9]. Hal ini menjadikan mikrokontroler sangat sesuai untuk diaplikasikan pada mesin *Coil winding* otomatis.

Pengendalian gerak merupakan salah satu fungsi utama mikrokontroler dalam aplikasi mesin industri kecil hingga menengah. Mikrokontroler dapat menghasilkan sinyal kendali berupa pulsa digital untuk mengatur kecepatan, arah, dan posisi motor stepper secara presisi. Design and Implementation of a Microcontroller Based Workstation with Educational Purposes for the Control Systems Area mengenai pengendalian motor stepper berbasis mikrokontroler menunjukkan bahwa sistem embedded mampu mengimplementasikan kontrol gerak yang stabil dan presisi melalui pengaturan timing pulsa dan manajemen arus motor [10]. Pendekatan ini sangat relevan untuk mesin *Coil winder* yang membutuhkan sinkronisasi gerak antara putaran inti *Coil* dan mekanisme pengarah kawat.

Selain kendali motor, mikrokontroler juga mendukung implementasi sistem otomasi berbasis waktu nyata (*real-time control*). Dalam sistem manufaktur otomatis, mikrokontroler digunakan untuk memproses sinyal input, mengeksekusi algoritma kendali, dan memberikan respons dalam waktu yang deterministik. Sistem *embedded* berbasis mikrokontroler mampu memenuhi kebutuhan kendali *real-time* pada mesin produksi skala kecil dengan tingkat akurasi dan keandalan yang tinggi.

Dengan kemampuan integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, mikrokontroler menjadi solusi yang efektif untuk membangun mesin *Coil winding* otomatis yang kompak dan ekonomis. Penggunaan mikrokontroler memungkinkan perancangan sistem yang modular, mudah dikembangkan, serta dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi tertentu melalui perubahan program tanpa modifikasi perangkat keras yang signifikan [9],[10].

a. *Arduino Nano*



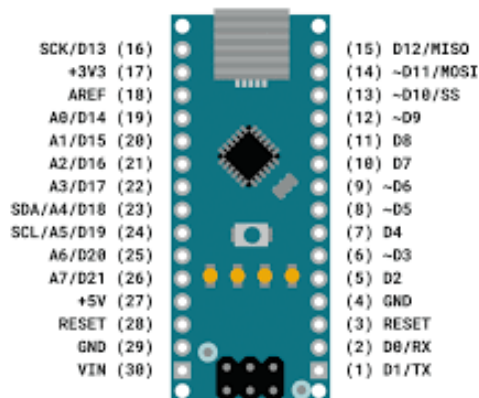
**Gambar 2- 3** Arduino Nano

Arduino Nano merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega328 yang dirancang sebagai platform *open-source* untuk pengembangan sistem *embedded* dan otomasi. Arduino Nano mengintegrasikan mikrokontroler, rangkaian catu daya, antarmuka pemrograman, serta pin *input/output* dalam satu papan, sehingga memudahkan proses perancangan dan implementasi sistem kendali tanpa memerlukan rangkaian tambahan yang kompleks. Karakteristik ini menjadikan Arduino Nano banyak digunakan pada aplikasi otomasi skala kecil hingga menengah, baik di bidang industri ringan maupun pendidikan. Contoh Arduino Nano ada di gambar 2-3.

Arduino Nano menyediakan berbagai fitur yang mendukung aplikasi kendali mesin, antara lain *port input/output* digital dan analog, timer/counter, modul komunikasi serial (UART), serta dukungan komunikasi I<sup>2</sup>C dan SPI. Fitur-fitur tersebut memungkinkan Arduino Nano untuk membaca sinyal input, mengolah data secara *real-time*, serta mengendalikan aktuator seperti motor dan driver motor dengan tingkat presisi yang baik. Kemampuan ini menjadikan Arduino Nano sesuai digunakan sebagai pengendali utama pada sistem mesin *Coil winder* otomatis.

Salah satu keunggulan utama Arduino Nano terletak pada lingkungan pengembangan Arduino IDE yang sederhana dan mudah digunakan. Lingkungan ini menyediakan pustaka (*library*) yang lengkap untuk pengendalian motor,

tampilan LCD, serta komunikasi antarmuka, sehingga proses pemrograman dan pengujian sistem dapat dilakukan secara lebih efisien. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan sistem kendali dilakukan dengan waktu yang lebih singkat serta mempermudah proses debugging dan modifikasi program sesuai kebutuhan aplikasi [1]. Pinout arduino nano dapat dilihat pada gambar 2-4 dan tabel 2-1 berikut.



**Gambar 2- 4** Pinout Arduino Nano

**Tabel 2- 1** Pinout Arduino Nano

No	Nama Pin	Kategori	Fungsi Utama	Keterangan
1	D0 (RX)	Digital	UART RX	Penerima data komunikasi serial
2	D1 (TX)	Digital	UART TX	Pengirim data komunikasi serial
3	D2	Digital	Digital I/O, Interrupt	Mendukung interupsi eksternal
4	D3	Digital	Digital I/O, PWM	<i>Output</i> PWM
5	D4	Digital	Digital I/O	Input/ <i>output</i> digital
6	D5	Digital	Digital I/O, PWM	<i>Output</i> PWM
7	D6	Digital	Digital I/O, PWM	<i>Output</i> PWM
8	D7	Digital	Digital I/O	Input/ <i>output</i> digital
9	D8	Digital	Digital I/O	Input/ <i>output</i> digital

10	D9	Digital	Digital I/O, PWM	<i>Output</i> PWM
11	D10	Digital	Digital I/O, PWM, SPI	Slave Select (SS)
12	D11	Digital	Digital I/O, PWM, SPI	MOSI (SPI)
13	D12	Digital	Digital I/O, SPI	MISO (SPI)
14	D13	Digital	Digital I/O, SPI	SCK dan LED internal
15	A0	Analog	Input Analog	ADC 10-bit
16	A1	Analog	Input Analog	ADC 10-bit
17	A2	Analog	Input Analog	ADC 10-bit
18	A3	Analog	Input Analog	ADC 10-bit
19	A4	Analog	Input Analog, I <sup>2</sup> C	SDA (Data I <sup>2</sup> C)
20	A5	Analog	Input Analog, I <sup>2</sup> C	SCL (Clock I <sup>2</sup> C)
21	VIN	Power	Tegangan Masuk	Input tegangan eksternal (7–12 V)
22	5V	Power	Tegangan Keluaran	Tegangan 5 V
23	3.3V	Power	Tegangan Keluaran	Tegangan 3.3 V
24	GND	Power	Ground	Ground sistem
25	RESET	Kontrol	Reset Sistem	Mengatur ulang Arduino
26	AREF	Referensi	Referensi ADC	Tegangan referensi ADC
27	IOREF	Referensi	Referensi Logika	Referensi tegangan I/O

Selain kemudahan pemrograman, Arduino Nano juga memiliki stabilitas operasi yang baik serta konsumsi daya yang relatif rendah. Kombinasi antara kemudahan integrasi perangkat keras, fleksibilitas pemrograman, dan ketersediaan dukungan komunitas yang luas menjadikan Arduino Nano sebagai solusi yang ekonomis dan andal untuk sistem otomasi mesin. Oleh karena itu, Arduino Nano dipilih sebagai pusat kendali pada mesin *Coil winder* otomatis yang dirancang dalam Tugas Akhir ini.

#### 2.2.4 Motor Listrik

Motor listrik merupakan komponen aktuator utama dalam sistem mesin *Coil winder* otomatis yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa gerakan rotasi maupun translasi. Pada penelitian ini, motor listrik berperan penting dalam menggerakkan mekanisme lilitan *Coil*, pengaturan pergerakan sistem, serta menjaga konsistensi proses pelilitan agar sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Pemilihan jenis motor listrik disesuaikan dengan kebutuhan sistem, tingkat ketelitian yang diinginkan, serta kemudahan pengendalian melalui mikrokontroler.

Motor listrik yang digunakan dalam sistem ini terdiri dari dua motor stepper NEMA17. Motor stepper NEMA17 pertama digunakan sebagai penggerak utama karena mampu menghasilkan gerakan langkah yang presisi dan terkontrol. Karakteristik ini sangat penting dalam proses *Coil winding*, khususnya untuk menjaga ketelitian jumlah lilitan, kestabilan posisi, serta keseragaman distribusi kawat pada *Coil*. Motor stepper NEMA17 dikendalikan menggunakan driver motor stepper A4988, yang berfungsi sebagai antarmuka antara mikrokontroler dan motor, sekaligus mengatur arah putaran, kecepatan, dan arus yang diberikan ke motor. Motor stepper

NEMA 17 kedua digunakan sebagai pengatur posisi distribusi *Coil*. Motor ini dipilih karena dapat dikombinasikan dengan *rod* berulir yang akan digunakan mengatur pergerakan moncong distribusi *Coil* dengan presisi.

Integrasi antara motor stepper NEMA17 dan motor driver memungkinkan sistem *Coil winder* bekerja secara optimal dan fleksibel. Motor driver berperan penting dalam memastikan motor bekerja pada kondisi yang aman dan stabil, melindungi mikrokontroler dari beban arus yang besar, serta memungkinkan pengaturan parameter motor secara presisi melalui pemrograman. Dengan kombinasi tersebut, sistem yang dirancang mampu menghasilkan proses pelilitan *Coil* yang lebih konsisten, efisien, dan mudah dikendalikan dibandingkan dengan metode manual.

a. *Driver Motor Stepper A4988*

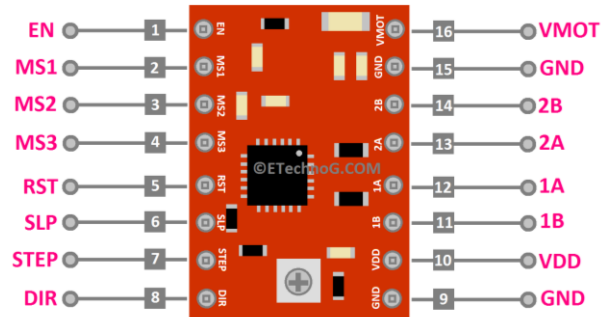


**Gambar 2- 5** Driver Motor Stepper A4988

Driver motor stepper merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi sebagai penghubung antara mikrokontroler dan motor stepper. Driver ini bertugas mengatur aliran arus dan tegangan ke kumparan motor sesuai dengan sinyal kendali digital yang diberikan oleh mikrokontroler. Penggunaan driver motor stepper memungkinkan motor digerakkan secara presisi karena setiap pulsa kendali dapat diterjemahkan menjadi langkah sudut tertentu pada motor [11]. Motor driver a4988 seperti pada gambar 2-5.

Dalam sistem otomasi, driver motor stepper umumnya mendukung beberapa mode penggerakan seperti *full step*, *half step*, dan *microstepping*. Mode *microstepping* memungkinkan pembagian satu langkah motor menjadi beberapa sub-langkah yang lebih kecil, sehingga menghasilkan gerakan yang lebih halus dan mengurangi getaran mekanik. Pemilihan driver motor stepper yang tepat berpengaruh langsung terhadap efisiensi energi, stabilitas gerak, serta performa keseluruhan sistem kendali berbasis mikrokontroler.

A4988 Module Pinout Diagram



Gambar 2- 6 Pinout Driver Motor Stepper A4988

Tabel 2- 2 Pinout Driver Motor Stepper A4988

No	Nama Pin	Kategori	Fungsi	Penjelasan
1	STEP	Kontrol	Step Input	Menerima pulsa dari mikrokontroler untuk menggerakkan motor satu langkah sesuai resolusi microstepping
2	DIR	Kontrol	Direction	Menentukan arah putaran motor stepper
3	EN	Kontrol	Enable	Mengaktifkan atau menonaktifkan <i>output</i> driver (aktif LOW)
4	MS1	Konfigurasi	Microstep Select	Mengatur resolusi microstepping motor
5	MS2	Konfigurasi	Microstep Select	Mengatur resolusi microstepping motor
6	MS3	Konfigurasi	Microstep Select	Mengatur resolusi microstepping motor
7	RST	Kontrol	Reset Driver	Menginisialisasi ulang driver dan menonaktifkan <i>output</i> sementara
8	SLP	Kontrol	Sleep Mode	Mengaktifkan mode hemat daya driver (aktif LOW)
9	VDD	Catu Daya	Logic Supply	Tegangan catu logika (3–5,5 V) dari mikrokontroler
10	GND	Catu Daya	Ground	Ground sistem logika
11	VMOT	Catu Daya	Motor Supply	Tegangan catu daya motor stepper (8–35 V)

12	GND (Motor)	Catu Daya	Ground Motor	Ground khusus untuk catu daya motor
13	1A	<i>Output Motor</i>	Kumparan A	<i>Output</i> ke kumparan A motor stepper
14	1B	<i>Output Motor</i>	Kumparan A	<i>Output</i> ke kumparan A motor stepper
15	2A	<i>Output Motor</i>	Kumparan B	<i>Output</i> ke kumparan B motor stepper
16	2B	<i>Output Motor</i>	Kumparan B	<i>Output</i> ke kumparan B motor stepper

Gambar 2-6 dan Tabel 2-2 menjelaskan pinout motor driver a4988. Driver A4988 merupakan salah satu driver motor stepper yang banyak digunakan pada sistem otomasi dan mesin presisi skala kecil. Driver ini memiliki kemampuan pengaturan *microstepping* serta fitur pembatasan arus (*current limiting*) yang berfungsi melindungi motor dari kelebihan arus dan panas berlebih. Fitur tersebut memungkinkan motor stepper beroperasi secara stabil meskipun bekerja dalam durasi yang lama, sebagaimana dibutuhkan pada proses penggulungan kawat mesin *Coil winder* otomatis [11].

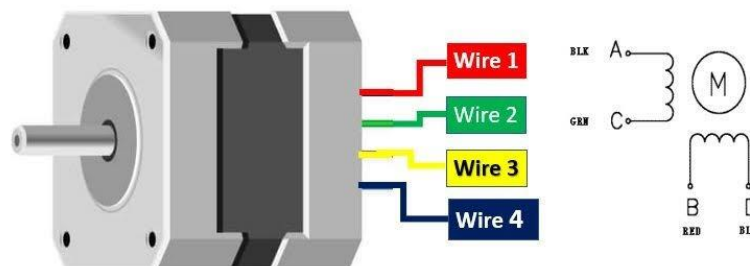
Selain itu, penggunaan driver A4988 memungkinkan integrasi yang sederhana dengan mikrokontroler karena hanya memerlukan sinyal kendali berupa pulsa langkah (*step*) dan arah (*direction*). Pendekatan ini mempermudah perancangan sistem kontrol serta meningkatkan fleksibilitas dalam pengaturan kecepatan dan jumlah langkah motor. Dengan karakteristik tersebut, driver A4988 menjadi solusi yang efektif untuk pengendalian motor stepper pada mesin *Coil winding* otomatis berbasis mikrokontroler.

b. *Motor Stepper NEMA17*



**Gambar 2- 7** Motor Stepper Nema17

Motor stepper tipe NEMA17 merupakan salah satu jenis motor stepper yang banyak digunakan pada sistem otomatisasi dan kendali presisi. Motor stepper NEMA17 contohnya pada gambar 2-7. Penamaan NEMA17 mengacu pada standar ukuran fisik motor yang ditetapkan oleh *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), di mana motor ini memiliki dimensi flange yang relatif kompak sehingga mudah diintegrasikan ke dalam berbagai sistem mekanik. Motor stepper NEMA17 bekerja berdasarkan prinsip gerak diskrit, yaitu menghasilkan sudut putaran tertentu untuk setiap pulsa listrik yang diberikan. Berikut gambar 2-8 dan Tabel 2-3 yang menjelaskan pinout motor stepper NEMA17.



**Gambar 2- 8** Pinout Motor Stepper Nema17

**Tabel 2- 3** Pinout Motor Stepper Nema17

No	Warna Kabel	Nama Kumparan	Terminal Driver	Keterangan
1	Hitam	Kumparan A+	1A	Ujung pertama kumparan A
2	Hijau	Kumparan A-	1B	Ujung kedua kumparan A
3	Merah	Kumparan B+	2A	Ujung pertama kumparan B
4	Biru	Kumparan B-	2B	Ujung kedua kumparan B

Karakteristik utama motor stepper NEMA17 adalah kemampuannya dalam menghasilkan gerakan yang akurat dan berulang tanpa memerlukan sistem umpan balik posisi yang kompleks. Karakteristik ini menjadikan motor stepper NEMA17 banyak digunakan pada aplikasi yang membutuhkan pengaturan posisi dan kecepatan secara presisi, seperti mesin CNC, printer 3D, dan sistem otomasi berbasis mikrokontroler.

Menurut Aurelia Zafira Putri dkk., dalam *Implementation of Nema-17 Stepper Motor and SG90 Servo Motor as Mechanical Drivers on Spinal Needle Positioning Test Equipment*, motor stepper NEMA17 telah diimplementasikan sebagai aktuator mekanik dalam sistem penentuan posisi dan menunjukkan performa yang stabil serta tingkat presisi yang baik. Penelitian tersebut menegaskan bahwa motor NEMA17 mampu bekerja secara andal dalam sistem kendali yang membutuhkan ketelitian gerak dan konsistensi posisi, sehingga sesuai untuk digunakan pada aplikasi otomasi dan peralatan presisi [4].

Selain itu, motor stepper NEMA17 memiliki kompatibilitas yang baik dengan berbagai jenis driver motor stepper yang mendukung teknik *microstepping*. Kombinasi motor NEMA17 dengan driver yang sesuai memungkinkan pengendalian gerak yang lebih halus serta mengurangi getaran mekanik selama operasi. Dengan karakteristik tersebut, motor stepper NEMA17 menjadi pilihan yang tepat sebagai penggerak utama pada mesin *Coil winder* otomatis berbasis mikrokontroler.

### 2.2.5 Sensor dan Media Interface

Media *interface* merupakan bagian penting dalam sistem otomasi karena berfungsi sebagai penghubung antara pengguna dan sistem yang dikendalikan. Melalui media *interface*, pengguna dapat memberikan perintah, melakukan pengaturan parameter, serta memantau kondisi dan status kerja sistem secara langsung. Keberadaan media *interface* yang baik akan meningkatkan kemudahan pengoperasian, mengurangi kesalahan penggunaan, serta mendukung efektivitas sistem kendali secara keseluruhan.

Pada mesin *Coil winder* otomatis berbasis mikrokontroler, media *interface* digunakan untuk menampilkan informasi proses dan menerima input dari pengguna selama pengoperasian mesin. Informasi yang ditampilkan dapat berupa status sistem, parameter kerja, maupun hasil pengaturan yang telah dilakukan. Sementara itu, perangkat input memungkinkan pengguna untuk memberikan perintah atau memilih menu pengaturan sesuai kebutuhan. Oleh karena itu, pemilihan jenis media interface harus mempertimbangkan kemudahan penggunaan, keandalan, serta kompatibilitas dengan sistem mikrokontroler.

#### a. LCD I2C



**Gambar 2- 9** LCD I2C

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan perangkat tampilan yang banyak digunakan dalam sistem *embedded* untuk menyajikan informasi kepada pengguna secara visual. LCD mampu menampilkan data berupa teks maupun

simbol sederhana, sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi dan status kerja suatu sistem. Dalam sistem otomasi berbasis mikrokontroler, LCD berperan sebagai media *interface* utama yang menyajikan informasi hasil pemrosesan data secara langsung. LCD I2C dapat dilihat pada gambar 2-9.

Penggunaan antarmuka I2C (*Inter-Integrated Circuit*) pada modul LCD bertujuan untuk menyederhanakan komunikasi antara mikrokontroler dan perangkat tampilan. Antarmuka I2C memungkinkan pengiriman data hanya melalui dua jalur komunikasi, yaitu jalur data (SDA) dan jalur clock (SCL). Dengan penggunaan protokol ini, jumlah pin *input/output* pada mikrokontroler dapat diminimalkan, sehingga lebih efisien dan memudahkan integrasi dengan komponen lain dalam sistem.

Dalam penerapan sistem berbasis mikrokontroler, LCD dengan antarmuka I2C banyak digunakan sebagai media tampilan parameter dan status sistem. Penggunaan LCD berbasis I2C pada sistem kendali dan monitoring memungkinkan penyajian informasi secara *real-time* dengan tingkat keandalan yang baik, sekaligus meningkatkan kemudahan interaksi antara pengguna dan sistem otomatis. Hal ini membuktikan bahwa LCD I2C merupakan solusi tampilan yang efektif untuk aplikasi *embedded*. Pinout LCD I2C dijelaskan pada gambar 2-10 dan tabel 2-4.



**Gambar 2- 10** Pinout LCD I2C

**Tabel 2- 4** Pinout LCD I2C

No	Nama Pin	Fungsi	Keterangan
1	GND	Ground	Terhubung ke ground sistem mikrokontroler

2	VCC	Catu Daya	Tegangan suplai LCD, umumnya +5 V
3	SDA	Serial Data	Jalur data komunikasi I <sup>2</sup> C antara mikrokontroler dan LCD
4	SCL	Serial Clock	Jalur clock komunikasi I <sup>2</sup> C antara mikrokontroler dan LCD

Pada mesin *Coil winder* otomatis, LCD I2C digunakan untuk menampilkan informasi penting seperti status operasi mesin dan parameter pengaturan yang telah ditentukan oleh pengguna. Dengan tampilan yang sederhana dan komunikasi yang efisien, LCD I2C mendukung proses pengoperasian mesin agar lebih mudah dipahami dan dikendalikan. Oleh karena itu, penggunaan LCD I2C menjadi bagian penting dalam perancangan media interface pada sistem ini.

*b.* Push button

*Push button* merupakan salah satu perangkat input yang paling umum digunakan dalam sistem *embedded* dan otomasi sebagai media interaksi langsung antara pengguna dan sistem. *Push button* bekerja sebagai sakelar sesaat (*momentary switch*) yang akan menghubungkan atau memutuskan rangkaian listrik ketika ditekan. Dalam sistem berbasis mikrokontroler, *push button* digunakan untuk memberikan perintah sederhana seperti pemilihan menu, pengaturan parameter, atau menjalankan dan menghentikan proses kerja sistem. Gambar dan pinout *push button* seperti pada gambar 2-11 dan tabel 2-5.



**Gambar 2- 11** Push button

**Tabel 2- 5** Pinout Push button

No	Nama Pin	Fungsi	Keterangan
1	Terminal A	Input Sinyal	Terhubung ke pin input mikrokontroler sebagai sinyal tombol
2	Terminal B	Ground / VCC	Dihubungkan ke ground (pull-down) atau VCC (pull-up)

Pada perancangan sistem antarmuka manusia-mesin (*Human Machine Interface/HMI*), *push button* berperan penting karena menawarkan metode input yang sederhana, andal, dan mudah dipahami oleh pengguna. Menurut Gireesh N P dan Deepa dalam *Designing Hmi Using Rx Series Rx63n Microcontroller* mengenai perancangan HMI berbasis mikrokontroler menunjukkan bahwa penggunaan perangkat input seperti *push button* memungkinkan sistem dikendalikan secara efektif tanpa memerlukan antarmuka yang kompleks, sehingga cocok diterapkan pada mesin otomatis skala kecil hingga menengah [12].

Dalam implementasinya pada sistem mikrokontroler, sinyal dari *push button* dibaca melalui pin input digital dan diolah oleh perangkat lunak untuk diterjemahkan menjadi perintah tertentu. Pengolahan sinyal ini memungkinkan satu atau beberapa tombol digunakan untuk mengakses berbagai fungsi sistem. Oleh karena itu, perancangan logika pembacaan *push button* harus dilakukan dengan baik agar sistem dapat merespons input pengguna secara akurat dan konsisten.

Pada mesin *Coil winder* otomatis, *push button* digunakan sebagai media *input* untuk mengatur dan mengendalikan operasi mesin. Dengan adanya *push button*, pengguna dapat berinteraksi langsung dengan sistem untuk menjalankan proses penggulungan atau melakukan pengaturan sesuai kebutuhan. Penggunaan *push button* sebagai bagian dari media interface mendukung kemudahan pengoperasian serta meningkatkan keandalan sistem kendali secara keseluruhan.

c. Hall Effect Sensor A3144

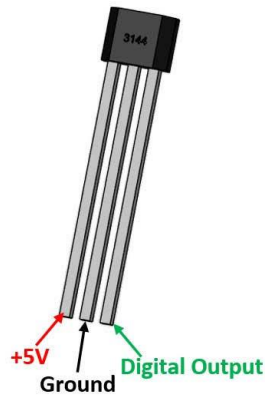
Hall Effect Sensor A3144 merupakan sensor berbasis efek Hall (Hall Effect) yang berfungsi untuk mendeteksi keberadaan medan magnet dan menghasilkan sinyal keluaran digital. Sensor ini banyak digunakan pada sistem otomasi, pengukuran kecepatan putaran (rotational speed), penghitung putaran (rotation counter), pendeteksi posisi, serta sistem kendali berbasis mikrokontroler. Dibandingkan dengan sensor mekanik, Hall Sensor memiliki keunggulan karena bekerja tanpa kontak fisik (contactless), sehingga lebih tahan terhadap keausan mekanik dan memiliki umur pakai yang lebih panjang.

Prinsip kerja Hall Sensor didasarkan pada Hall Effect, yaitu fenomena munculnya tegangan Hall ketika suatu material semikonduktor dialiri arus listrik dan dikenai medan magnet yang arahnya tegak lurus terhadap arah aliran arus. Pada Hall Sensor A3144, fenomena tersebut dimanfaatkan untuk mendeteksi keberadaan magnet. Ketika kutub magnet dengan polaritas yang sesuai berada di dekat sensor, rangkaian internal akan mengubah kondisi keluaran (output) dari logika HIGH menjadi logika LOW. Sebaliknya, ketika magnet menjauh dari sensor, keluaran kembali menjadi logika HIGH.

Pada penelitian ini, Hall Sensor A3144 digunakan sebagai sensor pembaca jumlah putaran (rotation sensor) pada poros spool mesin coil winding. Sebuah magnet permanen dipasang pada poros spool sehingga setiap satu kali putaran spool menghasilkan satu pulsa digital pada keluaran sensor. Pulsa tersebut kemudian dibaca oleh Arduino Nano melalui pin interrupt, sehingga setiap pulsa yang diterima merepresentasikan satu putaran aktual spool. Informasi tersebut selanjutnya digunakan untuk menampilkan jumlah putaran aktual pada LCD sebagai pembanding terhadap jumlah lilitan yang dihitung oleh sistem.

Penggunaan Hall Sensor A3144 dipilih karena memiliki beberapa keunggulan, yaitu mampu bekerja pada kecepatan putaran tinggi, tidak mengalami contact bouncing seperti rotary encoder mekanik, memiliki respon

yang cepat, serta menghasilkan sinyal digital yang stabil sehingga mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler.



**Gambar 2- 12** Pinout Hall Sensor A3144

**Tabel 2- 6** Pinout Hall Sensor A3144

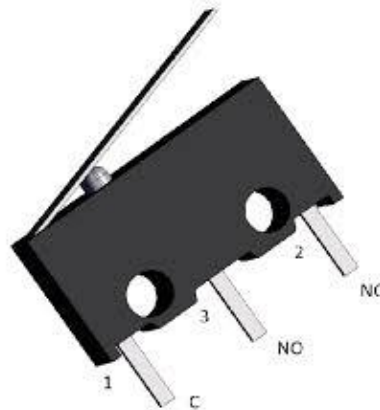
No.	Pin	Fungsi
1	VCC	Catu daya sensor sebesar 4.5-24VDC.
2	GND	Ground atau referensi tegangan sensor
3	OUT	Keluaran digital sensor

Pada Gambar 2-12 dan Tabel 2-6 diatas, dijelaskan pinout dari Rotary Sensor KY040. Pada penelitian ini digunakan rotary encoder incremental tipe KY-040 sebagai sensor umpan balik (feedback) untuk memverifikasi jumlah putaran spool selama proses winding berlangsung. Rotary encoder dipasang pada poros spool sehingga setiap putaran spool menghasilkan pulsa digital yang dibaca oleh Arduino Nano. Data jumlah pulsa tersebut digunakan untuk memastikan bahwa jumlah putaran spool sesuai dengan jumlah lilitan yang telah diinput oleh pengguna. Dengan adanya mekanisme verifikasi tersebut, sistem mampu mendeteksi kemungkinan terjadinya kehilangan langkah (missed step) pada motor stepper maupun kesalahan mekanis lainnya, sehingga meningkatkan keandalan dan ketelitian proses pembuatan coil.

#### d. Limit Switch

Limit switch merupakan salah satu jenis saklar elektromekanis yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan atau posisi suatu objek melalui kontak mekanis. Saklar ini akan berubah kondisi ketika tuas atau aktuatornya menerima gaya tekan dari suatu benda sehingga menghasilkan perubahan sinyal listrik yang dapat dibaca oleh sistem kontrol. Limit switch banyak digunakan pada sistem otomasi industri, mesin produksi, konveyor, mesin CNC, dan berbagai peralatan mekanik sebagai sensor batas pergerakan (end stop sensor).

Secara umum, limit switch terdiri atas aktuator mekanis, pegas pengembali (return spring), serta kontak listrik yang terdiri dari terminal Common (COM), Normally Open (NO), dan Normally Closed (NC). Pada kondisi normal, kontak NO berada pada kondisi terbuka sedangkan kontak NC berada pada kondisi tertutup. Ketika aktuator menerima tekanan, posisi kontak akan berubah sehingga menghasilkan perubahan logika yang dapat dideteksi oleh mikrokontroler atau sistem kendali.



**Gambar 2- 13** Pinout Limit Switch

**Tabel 2- 7** Pinout Limit Switch

No.	Terminal	Nama Terminal	Fungsi
1	COM	Common	Terminal utama yang menjadi titik referensi perpindahan kontak.
2	NO	Normally Open	Terhubung ke COM ketika aktuator limit switch ditekan. Pada kondisi normal kontak berada dalam keadaan terbuka.

3	NC	Normally Closed	Terhubung ke COM ketika aktuator tidak ditekan. Saat limit switch ditekan, kontak ini akan terbuka.
---	----	-----------------	---

Pada Gambar 2-13 dan Tabel 2-7 menjelaskan pinout dari limit switch. Prinsip kerja limit switch didasarkan pada perubahan kondisi kontak akibat adanya tekanan mekanis. Ketika aktuator belum tertekan, sinyal keluaran berada pada kondisi awal sesuai jenis kontak yang digunakan. Setelah aktuator tertekan oleh objek, kontak internal berpindah sehingga menghasilkan perubahan sinyal listrik. Perubahan sinyal tersebut kemudian digunakan sebagai informasi bahwa suatu mekanisme telah mencapai posisi tertentu atau batas gerakannya.

Penggunaan limit switch pada sistem otomasi memiliki beberapa kelebihan, di antaranya memiliki konstruksi yang sederhana, biaya yang relatif rendah, mudah diintegrasikan dengan sistem mikrokontroler, serta memiliki keandalan yang tinggi untuk mendeteksi posisi mekanik. Namun demikian, karena bekerja berdasarkan kontak mekanis, limit switch memiliki umur operasi yang dipengaruhi oleh frekuensi penggunaan serta gaya tekan yang diterima selama proses kerja.

Pada penelitian ini, limit switch digunakan sebagai sensor batas pergerakan mekanisme pengarah kawat (wire guide). Dua buah limit switch dipasang pada kedua ujung lintasan lead screw untuk mendeteksi posisi maksimum pergerakan wire guide. Ketika salah satu limit switch tertekan, Arduino Nano akan mengubah arah putaran motor stepper sehingga mekanisme pengarah kawat bergerak ke arah berlawanan. Selain itu, limit switch pada sisi awal juga digunakan sebagai referensi proses homing sehingga posisi awal sistem dapat ditentukan secara otomatis sebelum proses winding dimulai.

### **2.2.6 Power Supply**

*Power supply* merupakan bagian penting dalam sistem elektronika dan otomasi karena berfungsi sebagai penyedia energi listrik bagi seluruh komponen sistem. Kualitas dan kestabilan catu daya sangat mempengaruhi kinerja serta keandalan sistem kendali berbasis mikrokontroler. Tegangan dan arus yang tidak sesuai dapat

menyebabkan gangguan kerja, ketidakstabilan sistem, bahkan kerusakan pada komponen elektronik.

Pada sistem otomasi, *power supply* tidak hanya berfungsi sebagai sumber tegangan, tetapi juga sebagai elemen yang memastikan setiap bagian sistem menerima suplai daya sesuai dengan kebutuhan operasionalnya. Perangkat seperti mikrokontroler, driver motor, sensor, dan media interface umumnya memiliki kebutuhan tegangan yang berbeda, sehingga diperlukan perancangan sistem catu daya yang tepat dan terstruktur.

Dalam perancangan mesin *Coil winder* otomatis, sistem *power supply* dirancang untuk menyuplai daya yang cukup bagi beban aktuator serta rangkaian kontrol secara bersamaan. Oleh karena itu, diperlukan sumber tegangan utama dengan kapasitas arus yang memadai serta rangkaian penurun dan penstabil tegangan untuk memenuhi kebutuhan komponen logika.

a. 3A/12V Wall Wart

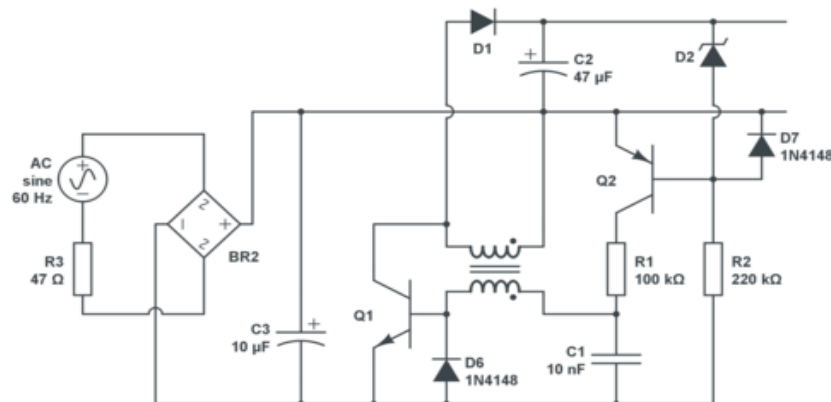


**Gambar 2- 14** Wall Wart/Adaptor AC-DC

Pada gambar 2-14 ditunjukkan bentuk fisik dari *wall wart*. *Wall wart* merupakan adaptor daya eksternal yang berfungsi mengubah tegangan listrik AC dari sumber listrik utama menjadi tegangan DC dengan nilai tertentu sesuai kebutuhan sistem. Penggunaan *wall wart* sebagai sumber catu daya utama banyak diterapkan pada sistem *embedded* dan otomasi karena sifatnya yang praktis,

terisolasi dari jaringan listrik utama, serta mampu menyediakan tegangan DC yang relatif stabil. Dalam perancangan sistem elektronika, *wall wart* sering digunakan untuk menyuplai rangkaian daya sebelum didistribusikan ke bagian lain sistem.

Adaptor AC–DC modern umumnya menggunakan konsep *switched mode power supply* (SMPS) dengan konversi frekuensi tinggi untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi ukuran fisik transformator. Dr. R. Kalpana dkk., dalam *Design and Implementation of High Frequency Isolated AC-DC Converter for Switched Mode Power Supplies* mengenai desain dan implementasi konverter AC–DC terisolasi frekuensi tinggi menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menghasilkan tegangan DC yang stabil dengan efisiensi yang baik, serta memberikan isolasi listrik yang aman antara sisi input dan *output* [13]. Karakteristik ini menjadikan adaptor AC–DC sangat sesuai digunakan sebagai *wall wart* untuk sistem kendali berbasis mikrokontroler. Rangkaian SMPS dan komponennya dapat dilihat di Gambar 2-15 dan Tabel 2-8 berikut.



Gambar 2- 15 Rangkaian SMPS

Tabel 2- 8 Komponen SMPS

No.	Kode Komponen	Nama Komponen	Nilai / Tipe	Fungsi
1	AC	Sumber AC	220 VAC, 50 Hz	Sumber tegangan masukan rangkaian.

2	R3	Resistor	47 $\Omega$	Membatasi arus masuk ( <i>inrush current</i> ) pada sisi input.
3	BR2	Bridge Rectifier	Dioda Bridge	Menyearahkan tegangan AC menjadi DC.
4	C3	Kapasitor Elektrolit	10 $\mu\text{F}$	Meratakan tegangan DC hasil penyearah.
5	Q1	Transistor NPN	(Tidak dicantumkan)	Saklar utama pada sisi primer transformator.
6	Transformator	Transformator Ferrite	Flyback Transformer	Mengubah level tegangan sekaligus memberikan isolasi antara sisi primer dan sekunder.
7	D6	Dioda	1N4148	Melindungi transistor Q1 dari tegangan balik ( <i>back EMF</i> ) pada lilitan primer.
8	D1	Dioda Penyearah	Fast Recovery Diode	Menyearahkan tegangan keluaran transformator.
9	C2	Kapasitor Elektrolit	47 $\mu\text{F}$	Filter tegangan keluaran agar lebih stabil dan mengurangi ripple.
10	D2	Dioda Zener	(Nilai tidak dicantumkan)	Membatasi tegangan keluaran sebagai proteksi tegangan lebih.
11	Q2	Transistor PNP/NPN	(Tidak dicantumkan)	Pengendali regulasi tegangan keluaran melalui rangkaian umpan balik ( <i>feedback</i> ).
12	R1	Resistor	100 k $\Omega$	Resistor bias transistor Q2.
13	R2	Resistor	220 k $\Omega$	Pembagi tegangan ( <i>voltage divider</i> ) untuk rangkaian umpan balik.
14	C1	Kapasitor	10 nF	Filter sinyal umpan balik dan meningkatkan stabilitas osilasi.
15	D7	Dioda	1N4148	Dioda proteksi pada rangkaian kontrol dan umpan balik.

Selain itu, desain power supply AC–DC juga harus memperhatikan kestabilan tegangan *output* terhadap perubahan beban. Sistem konversi yang dirancang dengan baik mampu mempertahankan tegangan *output* yang konsisten meskipun terjadi variasi beban pada sisi *output*. Hal ini penting untuk memastikan seluruh komponen sistem menerima suplai daya yang sesuai dengan spesifikasi kerjanya.

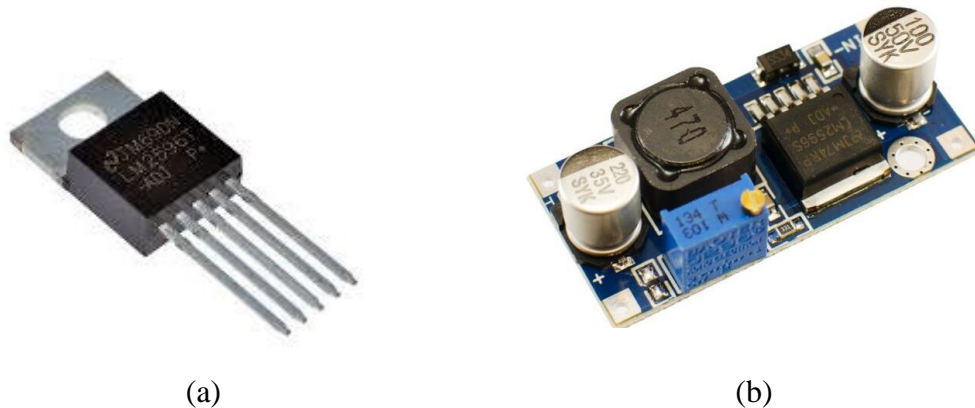
Dalam mesin *Coil winder* otomatis, wall wart dengan spesifikasi 12 V dan arus hingga 3A digunakan sebagai sumber daya utama untuk menyuplai rangkaian driver motor dan komponen pendukung lainnya. Pemilihan wall wart dengan kapasitas arus yang memadai bertujuan untuk memastikan kebutuhan daya sistem terpenuhi tanpa menyebabkan penurunan tegangan yang dapat mengganggu kinerja motor maupun rangkaian kontrol. Dengan demikian, penggunaan 3A/12V wall wart menjadi solusi yang tepat sebagai sumber catu daya utama dalam perancangan sistem ini.

b. Module LM2596

LM2596 merupakan regulator tegangan linier yang berfungsi untuk menurunkan dan menstabilkan tegangan DC menjadi tegangan keluaran tetap sebesar 5 V. Regulator ini banyak digunakan pada rangkaian elektronika dan sistem embedded karena kemudahan penggunaannya serta kemampuannya dalam menyediakan tegangan yang stabil bagi komponen logika seperti mikrokontroler, sensor, dan media interface. Tegangan keluaran yang stabil sangat diperlukan agar sistem kendali dapat bekerja secara andal dan terhindar dari gangguan akibat fluktuasi tegangan.

Dalam sistem catu daya berbasis adaptor AC–DC, tegangan keluaran dari wall wart umumnya masih perlu diturunkan dan distabilkan sebelum digunakan oleh rangkaian logika. Dalam *Study of an AC/DC Converter Powered by DC Voltage* mengenai konverter AC–DC menegaskan bahwa tahapan regulasi tegangan merupakan bagian penting dalam sistem power supply untuk memastikan kualitas tegangan DC yang sesuai dengan kebutuhan beban

elektronik [14]. Regulator seperti LM2596 berperan pada tahap ini dengan menjaga tegangan keluaran tetap konstan meskipun terjadi variasi beban. Gambar 2-14 dan tabel 2-7 menunjukan modul LM2596 dan pinoutnya.



**Gambar 2- 16** (a) LM2596, (b) Modul LM2596

**Tabel 2- 9** Pinout LM2596

No. Pin	Nama Pin	Fungsi Utama
1	VIN	Input tegangan (4V – 40V), sumber daya masuk
2	OUTPUT (SW)	Output switching ke induktor
3	GND	Ground / referensi
4	FEEDBACK (FB)	Input umpan balik untuk mengatur tegangan output
5	ON/OFF	Kontrol enable (low = aktif, high = nonaktif)

Selain itu, desain sistem catu daya untuk aplikasi elektronika harus memperhatikan kestabilan dan keandalan suplai tegangan DC. Publikasi *The Designs of Low Power AC-DC Converter for Power Electronics System Applications* yang membahas desain konverter AC-DC berdaya rendah menunjukkan bahwa penggunaan rangkaian regulasi tegangan yang tepat dapat meningkatkan kinerja dan keandalan sistem secara keseluruhan [15]. Dalam konteks ini, LM2596 digunakan sebagai 37 regulator linier untuk memastikan

tegangan 5 V yang dibutuhkan oleh mikrokontroler dan perangkat pendukung dapat terpenuhi secara stabil.

Pada mesin *Coil winder* otomatis, LM2596 digunakan untuk menurunkan tegangan dari sumber DC utama menjadi tegangan 5 V yang aman bagi rangkaian kontrol. Penggunaan regulator ini membantu memisahkan jalur catu daya antara rangkaian daya dan rangkaian logika, sehingga sistem dapat beroperasi dengan lebih stabil dan aman. Dengan demikian, LM2596 menjadi komponen penting dalam perancangan sistem power supply pada mesin *Coil winder* otomatis berbasis mikrokontroler.

### **2.2.7 Analisis Perhitungan**

Analisis perhitungan merupakan bagian penting dalam landasan teori yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja dan ketepatan suatu sistem secara kuantitatif. Melalui analisis ini, perbedaan antara nilai hasil perancangan atau pengukuran dengan nilai acuan dapat dinyatakan dalam bentuk parameter numerik yang terukur. Pendekatan kuantitatif diperlukan untuk memberikan gambaran objektif mengenai tingkat kesalahan, ketelitian, dan konsistensi sistem yang dirancang.

Dalam konteks mesin *Coil winder* otomatis, analisis perhitungan digunakan untuk menilai akurasi sistem dalam menghasilkan jumlah lilitan, kestabilan proses penggulungan, serta kesesuaian pergerakan motor terhadap nilai yang direncanakan. Parameter statistik dan metrik kesalahan digunakan sebagai alat bantu untuk mengevaluasi seberapa besar penyimpangan yang terjadi selama proses kerja sistem.

#### **a. Nilai Rata-Rata (Mean)**

Nilai rata-rata (*mean*) merupakan salah satu metode statistik deskriptif yang digunakan untuk menggambarkan nilai pusat dari sekumpulan data pengukuran. Nilai rata-rata diperoleh dengan menjumlahkan seluruh data kemudian membaginya dengan jumlah data yang tersedia. Dalam penelitian ini, nilai rata-rata digunakan untuk mengetahui kecenderungan hasil pengukuran resistansi *Coil* dan distribusi lilitan pada setiap titik pengukuran.

Penggunaan nilai rata-rata bertujuan untuk memberikan representasi umum terhadap hasil pengukuran yang diperoleh dari beberapa kali pengujian. Dengan mengetahui nilai rata-rata, peneliti dapat membandingkan karakteristik hasil *winding* yang dihasilkan oleh alat pada berbagai jenis kawat tembaga email yang digunakan.

Secara matematis, nilai rata-rata dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-1).

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad \text{Persamaan 2- 1}$$

dengan:

$\bar{x}$  = nilai rata-rata data pengukuran

$\sum x$  = jumlah data

$n$  = jumlah data pengukuran

Pada penelitian ini, perhitungan nilai rata-rata digunakan untuk menentukan nilai rata-rata resistansi *Coil* hasil *winding* serta rata-rata diameter *Coil* pada titik pengukuran P1, P2, P3, dan P4. Nilai rata-rata tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam analisis konsistensi distribusi lilitan dan perhitungan statistik lanjutan seperti standar deviasi dan *coefficient of variation* (CV).

#### b. Standar Deviasi (Standard Deviation)

Standar deviasi (standard deviation) merupakan parameter statistik yang digunakan untuk mengukur tingkat penyebaran atau variasi data terhadap nilai rata-ratanya. Parameter ini memberikan informasi mengenai konsistensi hasil pengukuran atau kinerja suatu sistem. Semakin kecil nilai standar deviasi, maka semakin kecil variasi data yang dihasilkan, sehingga menunjukkan kestabilan sistem yang lebih baik [16]. Secara matematis, standar deviasi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Persamaan 2- 2}$$

dengan:

SD = standar deviasi,

n = jumlah data pengamatan,

$\bar{x}$  = nilai rata-rata dari seluruh data.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa standar deviasi diperoleh dari akar kuadrat rata-rata kuadrat selisih antara setiap data dan nilai rata-ratanya. Nilai standar deviasi yang kecil menandakan bahwa data hasil pengukuran cenderung mengelompok di sekitar nilai rata-rata, sedangkan nilai standar deviasi yang besar menunjukkan bahwa data memiliki sebaran yang luas dan kurang konsisten.

Pada mesin *Coil winder* otomatis, standar deviasi dapat digunakan untuk menganalisis variasi jumlah lilitan yang dihasilkan pada setiap pengujian. Nilai standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan jumlah lilitan yang konsisten, sedangkan nilai yang tinggi mengindikasikan adanya fluktuasi kinerja yang perlu dianalisis lebih lanjut.

c. Coefficient of Variation (CV)

*Coefficient of Variation* (CV) atau koefisien variasi merupakan ukuran statistik yang digunakan untuk menyatakan tingkat penyebaran data relatif terhadap nilai rata-ratanya. Berbeda dengan standar deviasi yang menunjukkan besarnya penyebaran data dalam satuan yang sama dengan data pengukuran, koefisien variasi dinyatakan dalam bentuk persentase sehingga memungkinkan perbandingan tingkat variasi antar kelompok data yang memiliki satuan atau skala yang berbeda.

Koefisien variasi banyak digunakan dalam berbagai bidang penelitian untuk mengevaluasi tingkat konsistensi, homogenitas, dan presisi suatu kumpulan data. Semakin kecil nilai koefisien variasi yang diperoleh, maka semakin kecil pula tingkat variasi data terhadap nilai rata-ratanya. Sebaliknya,

nilai koefisien variasi yang besar menunjukkan bahwa data memiliki penyebaran yang relatif tinggi.

Secara matematis, koefisien variasi dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-3).

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad \text{Persamaan 2-3}$$

dengan:

CV = *Coefficient of Variation* (%)

SD = standar deviasi

$\bar{x}$  = nilai rata-rata data

Nilai koefisien variasi yang rendah menunjukkan bahwa data memiliki tingkat keseragaman yang tinggi, sedangkan nilai koefisien variasi yang tinggi menunjukkan adanya variasi yang lebih besar di dalam kelompok data yang diamati. Oleh karena itu, koefisien variasi sering digunakan sebagai indikator untuk menilai tingkat presisi atau konsistensi hasil pengukuran dalam suatu penelitian.

Selain digunakan untuk membandingkan tingkat variasi antar kelompok data, koefisien variasi juga dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam evaluasi performa suatu sistem pengukuran maupun proses yang menghasilkan data berulang. Dengan demikian, parameter ini menjadi salah satu metode statistik yang efektif untuk menganalisis kualitas dan kestabilan data hasil pengamatan.

### **2.2.8 Evaluasi Kinerja Sistem**

Evaluasi kinerja sistem merupakan tahapan penting dalam proses perancangan dan pengembangan suatu sistem otomasi untuk memastikan bahwa sistem yang dibangun telah memenuhi spesifikasi dan tujuan yang direncanakan. Evaluasi ini dilakukan dengan menganalisis hasil pengujian sistem secara menyeluruh, baik dari

sisi ketelitian, konsistensi, maupun akurasi kinerja setiap komponen yang terlibat dalam proses kerja sistem.

Pada mesin *Coil winder* otomatis, evaluasi kinerja sistem dilakukan untuk menilai kemampuan sistem dalam menghasilkan jumlah lilitan yang sesuai dengan perancangan, menjaga kerapatan dan distribusi lilitan yang seragam, serta memastikan ketepatan pergerakan motor stepper sebagai penggerak utama proses penggulungan. Hasil evaluasi ini menjadi dasar dalam menentukan tingkat keandalan dan efektivitas sistem secara keseluruhan.

Parameter evaluasi yang digunakan pada subbab ini mencakup ketelitian jumlah lilitan, kualitas kerapatan dan distribusi *Coil*, serta akurasi pergerakan motor stepper. Dengan melakukan evaluasi terhadap parameter-parameter tersebut, kinerja sistem dapat dianalisis secara objektif dan terukur, sehingga memberikan gambaran yang jelas mengenai kelebihan dan keterbatasan sistem yang dirancang sebelum dilakukan pengembangan atau penyempurnaan lebih lanjut.

a. Evaluasi Konsistensi Hasil Pengukuran

Konsistensi hasil pengukuran merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menilai kinerja suatu sistem berdasarkan kemampuan sistem tersebut dalam menghasilkan keluaran yang seragam pada pengujian berulang. Sistem yang memiliki tingkat konsistensi yang baik akan menghasilkan data yang relatif stabil dan memiliki variasi yang kecil antar pengukuran.

Dalam proses evaluasi, konsistensi hasil pengukuran dapat dianalisis menggunakan pendekatan statistik deskriptif. Analisis diawali dengan menentukan nilai rata-rata data menggunakan Persamaan (2-1) untuk memperoleh nilai representatif dari seluruh hasil pengukuran. Selanjutnya, tingkat penyebaran data terhadap nilai rata-ratanya dianalisis menggunakan standar deviasi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2-2).

Nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan bahwa hasil pengukuran cenderung berada di sekitar nilai rata-ratanya sehingga dapat dikatakan memiliki tingkat konsistensi yang baik. Sebaliknya, nilai standar deviasi yang besar

menunjukkan bahwa data memiliki variasi yang lebih tinggi dan tingkat konsistensinya lebih rendah.

Selain menggunakan nilai rata-rata dan standar deviasi, tingkat konsistensi data juga dapat dievaluasi melalui koefisien variasi (*Coefficient of Variation*) yang dihitung menggunakan Persamaan (2-3). Koefisien variasi digunakan untuk menunjukkan besarnya variasi data relatif terhadap nilai rata-ratanya dalam bentuk persentase. Semakin kecil nilai koefisien variasi yang diperoleh, maka semakin tinggi tingkat konsistensi hasil pengukuran yang dihasilkan oleh sistem.

Dengan melakukan evaluasi konsistensi hasil pengukuran, dapat diketahui tingkat kestabilan dan kemampuan suatu sistem dalam menghasilkan keluaran yang dapat diulang (*repeatable*) pada kondisi pengujian yang sama.

b. Evaluasi Distribusi Lilitan

Distribusi lilitan merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas hasil proses *winding*. Distribusi lilitan menunjukkan tingkat keseragaman penyebaran kawat pada area penggulangan. Distribusi yang baik ditandai dengan susunan lilitan yang relatif merata, teratur, dan tidak mengalami penumpukan yang berlebihan pada bagian tertentu.

Dalam proses evaluasi, distribusi lilitan dapat dianalisis melalui pengukuran dimensi fisik kumparan pada beberapa titik pengamatan yang mewakili area penggulangan. Pengukuran pada beberapa titik bertujuan untuk mengetahui apakah hasil *winding* yang dihasilkan memiliki pola distribusi yang seragam pada seluruh bagian kumparan.

Analisis distribusi lilitan diawali dengan menentukan nilai rata-rata hasil pengukuran menggunakan Persamaan (2-1). Nilai rata-rata digunakan untuk menggambarkan karakteristik umum dari data yang diperoleh pada setiap titik pengamatan. Selanjutnya, tingkat variasi data terhadap nilai rata-ratanya dianalisis menggunakan standar deviasi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2-2).

Nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan bahwa hasil pengukuran pada titik yang sama memiliki tingkat keseragaman yang tinggi sehingga distribusi lilitan dapat dikatakan lebih konsisten. Sebaliknya, nilai standar deviasi yang besar menunjukkan adanya variasi yang lebih tinggi pada distribusi lilitan yang dihasilkan.

Melalui evaluasi distribusi lilitan, dapat diketahui tingkat keseragaman hasil *winding* yang dihasilkan oleh suatu sistem. Oleh karena itu, analisis distribusi lilitan menjadi salah satu metode yang umum digunakan untuk menilai kualitas proses penggulangan dan performa mekanisme pengarah kawat pada sistem *winding*.

c. Evaluasi Ketelitian Sistem

Ketelitian sistem merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menilai kemampuan suatu sistem dalam menghasilkan keluaran yang konsisten dan memiliki tingkat variasi yang rendah. Semakin tinggi tingkat ketelitian yang dimiliki suatu sistem, maka semakin kecil penyimpangan hasil yang dihasilkan terhadap karakteristik rata-ratanya.

Dalam evaluasi ketelitian, data hasil pengukuran terlebih dahulu dianalisis menggunakan nilai rata-rata dan standar deviasi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2-1) dan Persamaan (2-2). Selanjutnya, tingkat variasi relatif data terhadap nilai rata-ratanya dihitung menggunakan Coefficient of Variation (CV) berdasarkan Persamaan (2-3).

Nilai Coefficient of Variation digunakan sebagai indikator tingkat penyebaran data relatif terhadap nilai rata-ratanya. Semakin kecil nilai CV yang diperoleh, maka semakin kecil variasi data yang terjadi dan semakin tinggi tingkat ketelitian sistem yang dievaluasi.

Untuk mempermudah interpretasi hasil, tingkat ketelitian sistem dapat dinyatakan dalam bentuk persentase menggunakan Persamaan (2-4).

$$\text{Ketelitian} = 100\% - CV$$

Persamaan 2-4

dengan:

*Ketelitian* = tingkat ketelitian sistem (%)

*CV* = *Coefficient of Variation* (%)

Berdasarkan Persamaan (2-4), nilai ketelitian akan meningkat seiring dengan menurunnya nilai koefisien variasi. Oleh karena itu, sistem yang memiliki nilai CV kecil akan menghasilkan nilai ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan sistem yang memiliki variasi data yang besar.

Evaluasi ketelitian sistem banyak digunakan dalam berbagai penelitian dan proses pengukuran untuk menilai tingkat kestabilan, konsistensi, dan kualitas keluaran yang dihasilkan. Dengan melakukan analisis ketelitian, dapat diketahui sejauh mana suatu sistem mampu menghasilkan performa yang seragam pada pengujian berulang dengan kondisi yang sama.