

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Rancang bangun alat penggulung otomatis merupakan teknologi yang memungkinkan proses pembentukan koil resistansi dilakukan secara presisi berdasarkan parameter yang telah ditentukan melalui sistem kontrol. Untuk menghasilkan koil pemanas (*heater*) yang memiliki nilai hambatan akurat, diperlukan sinkronisasi antara pergerakan mekanis *lead screw* dengan jumlah putaran motor yang konsisten. Teknologi ini bertujuan untuk mengoptimalkan efisiensi produksi elemen pemanas, mengurangi kesalahan manusia dalam penghitungan lilitan, serta memastikan setiap koil memenuhi spesifikasi daya listrik yang direncanakan.

Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pusat kendali yang menggerakkan Nema 17 melalui logika pemrograman. Mekanisme alat ini mengombinasikan *lead screw* 8mm dengan sebuah jig khusus yang dirancang untuk bergerak secara linier mendekati motor saat proses pelilitan dimulai dan menjahui motor saat proses mengeluarkan koil. Kawat nikelin berdiameter 0,3mm dimasukkan melalui lubang khusus pada jig untuk memastikan posisi kawat masuk dengan rapi ke dalam titik awal pelilitan pada *lead screw*.

Inovasi pada alat ini terletak pada kemudahan operasionalnya, di mana pengguna dapat menentukan target resistansi antara 30 ohm hingga 120 Ohm cukup dengan menekan tombol pada *keypad*. Sistem secara otomatis akan menghitung jumlah lilitan yang diperlukan dan menampilkan status prosesnya melalui LCD 16x2 secara *real-time*. Setelah proses pelilitan selesai, operator akan memotong kawat dan mengeluarkan koil dengan memanfaatkan arah putaran motor yang berlawanan jarum jam. Untuk mengembangkan sistem pembuatan elemen pemanas berbasis kendali digital yang lebih akurat dan efisien, perlu dilakukan pemahaman penelitian-penelitian sebelumnya yang memiliki relevansi dengan mekanika penggulangan dan karakteristik material nikelin ini:

1. Penelitian yang dilakukan oleh Widodo, Hartono, dan Sentana (2023) dalam studinya yang berjudul “Perancangan dan Pembuatan Mesin *Wire Coiller* Komponen *Atomizer* Otomatis” berfokus pada otomasi produksi koil untuk rokok elektrik (vape). Penelitian tersebut menekankan bahwa kerapatan lilitan yang seragam merupakan parameter krusial dalam menjaga stabilitas rasa *e-liquid*. Perbedaan mendasar antara penelitian tersebut dengan penelitian ini terletak pada jenis kawat yang digunakan, spesifikasi nilai resistansi, serta tujuan aplikasi koilnya. Jika penelitian sebelumnya berfokus pada kebutuhan mikroskopis *atomizer*, alat yang dikembangkan dalam tugas akhir ini dirancang untuk aplikasi beban daya yang lebih besar, seperti elemen pemanas pada setrika listrik, pemanas air, *rice cooker*, maupun kompor listrik portabel
2. Penelitian yang dilakukan oleh Januar Abdul Aziz, Farid Baskoro, Miftahur Rohman, dan Lusya Rakhmawati (2025) dalam studinya yang berjudul “Rancang Bangun Alat Penggulung Lilitan Kawat Motor Listrik Dengan Menggunakan Aplikasi Telegram Berbasis *Internet of Things* (IoT)” menitikberatkan pada proses perbaikan motor listrik melalui penggulangan ulang kumparan secara otomatis. Dalam penelitian tersebut, sistem penggerak menggunakan motor DC yang dikendalikan oleh *Driver* L298N dengan *sensor optocoupler* sebagai pemantau pulsa (penghitung lilitan). Sebagai bentuk pengembangan, penelitian ini mengadopsi motor stepper Nema 17 yang diintegrasikan dengan lead screw 8 mm. Penggunaan *motor stepper* memungkinkan kendali posisi dan jumlah lilitan yang jauh lebih presisi dalam sistem *Open Loop*, sehingga meniadakan kebutuhan sensor eksternal seperti *optocoupler* untuk fungsi perhitungan.
3. Penelitian yang dilakukan oleh Ampala Khoryanton, Ermanu Azizul Hakim (2024) dalam studinya yang berjudul “Analisis Perancangan *Coil Heater* Menggunakan Simulasi *SolidWorks Flow*” dalam studinya mengkaji efektivitas elemen pemanas yang bersifat statis. Dalam literatur tersebut, *coil heater* dipasang secara permanen pada saluran masuk udara

dan berfungsi murni sebagai penukar panas (*heat exchanger*) tanpa melibatkan komponen mekanik yang bergerak. Sebaliknya, alat yang dikembangkan ini memiliki karakteristik dinamis dengan mekanisme pergerakan linier yang kompleks. Melalui integrasi *lead screw* dan jig yang bergerak di atas *V-slot aluminium*, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai elemen pemanas, tetapi sebagai mesin manufaktur yang secara aktif membentuk produk melalui kontrol pergerakan mekanik yang presisi.

4. Berdasarkan data dari *Kanthal Heating Alloys Technical Handbook* mengkaji tentang kawat nikelin dengan komposisi 80% nikel dan 20% kromium diklasifikasikan ke dalam seri paduan Nikrothal® 80. Material ini dirancang khusus untuk aplikasi elemen pemanas karena memiliki resistivitas tinggi, ketahanan terhadap oksidasi pada suhu tinggi, serta kemampuan mempertahankan bentuk mekanis (*creep strength*) yang sangat baik dibandingkan jenis logam biasa. kawat Nikrothal® 80 dengan diameter nominal 0,3 mm (setara dengan ukuran 28 AWG) memiliki parameter operasi batas yang sangat rigid terhadap paparan suhu sebesar 1200°C dan batas arus listrik yang aman secara kontinu sebesar 1,4 ampere sampai 2,2 ampere. Dalam pembuatan alat ini, dilakukan uji coba hasil akhir koil dengan tegangan AC 220 volt selama 2 menit dan sehingga dapat diketahui nilai resistansi koil yang dapat bertahan dengan arus dan suhu tertentu.

2.2 Dasar Teori

Sistem penggulungan kawat otomatis merupakan solusi modern dalam bidang manufaktur elemen pemanas yang bertujuan untuk meningkatkan presisi nilai hambatan listrik serta efisiensi produksi koil resistansi. Dalam metode konvensional, pembuatan koil pemanas masih mengandalkan tenaga manusia atau alat manual, yang sering kali menyebabkan ketidakkonsistenan dalam kerapatan lilitan dan jumlah putaran kawat. Kondisi tersebut berakibat pada tidak akuratnya nilai resistansi yang dihasilkan, sehingga daya disipasi panas yang dikeluarkan oleh heater tidak sesuai dengan perencanaan teknis

serta meningkatkan risiko kegagalan produk akibat keterbatasan ketelitian manusia (*human error*).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkanlah alat *Wire Coiller* nikelin otomatis berbasis mikrokontroler Arduino Uno. Sistem kendali pada alat ini menerapkan metode kontrol loop terbuka (*Open Loop control system*), di mana instruksi pulsa keluaran dari mikrokontroler langsung dieksekusi oleh *Driver* untuk menggerakkan aktuator tanpa adanya sensor pembaca posisi sebagai umpan balik (*feedback*). Kendali *Open Loop* ini dipilih karena struktur sistem yang lebih sederhana, ekonomis, serta tetap memiliki keandalan tinggi selama beban torsi mekanis tidak melebihi kapasitas operasional dari motor *stepper* Nema 17.

Akurasi posisi pada alat ini bertumpu pada keberhasilan proses konversi mekanis dari gerak rotasi menjadi gerak translasi (*linier*). Motor *stepper* Nema 17 bergerak dalam inkremen sudut yang diskrit ($1,8^\circ$ per *step*), di mana putaran porosnya diteruskan oleh *Flexible Coupler* untuk memutar lead screw T8 berdiameter 8mm. Interaksi antara ulir lead screw dengan nut yang terpasang pada jig pemandu memaksa komponen tersebut bergerak maju atau mundur secara linier di atas V-Slot *Aluminium Profile*. Melalui mekanisme translasional ini, kawat nikelin dapat diumpankan secara konsisten agar membentuk kerapatan lilitan yang seragam di sepanjang sumbu horizontal.

Untuk menjamin keandalan konversi gerak rotasi ke translasi pada sistem *Open Loop* ini, dilakukan validasi melalui uji repetisibilitas mekanik. Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dengan mengambil 10 data sampel untuk setiap kelipatan 20 putaran motor, sistem mekanis ini menunjukkan tingkat kepresisian yang tinggi dengan nilai deviasi rata-rata pergeseran linier sebesar 4 cm. Karakteristik pergeseran yang konsisten ini membuktikan bahwa kombinasi Nema 17 dan lead screw sepanjang 70 cm mampu melakukan konversi jarak secara linear dengan kestabilan yang terjaga, sehingga standarisasi nilai hambatan tinggi pada koil nikelin yang dihasilkan dapat terpenuhi secara optimal.

2.2.1 Penggulungan Kawat Secara Otomatis

Sistem penggulungan kawat otomatis merupakan implementasi teknologi mekatronika yang bertujuan untuk meningkatkan presisi dan efisiensi dalam proses manufaktur komponen induktif maupun elemen pemanas. Sistem ini dirancang untuk menggantikan metode manual yang sering kali menghasilkan lilitan tidak seragam dan memakan waktu lama. Dengan mengintegrasikan kontrol motor yang presisi, sistem ini mampu menghasilkan jumlah lilitan yang akurat serta kerapatan yang konsisten, yang secara langsung memengaruhi nilai resistansi dan performa elektromagnetik dari produk yang dihasilkan.

Inti dari mekanisme ini terletak pada sinkronisasi antara motor penggerak utama (spindel) dan sistem distribusi kawat (pemandu linier). Mikrokontroler, seperti Arduino Uno berfungsi sebagai pusat kendali yang memproses algoritma pergerakan berdasarkan parameter yang dimasukkan, seperti diameter kawat dan lebar gulungan. Penggunaan motor stepper sering menjadi pilihan utama karena kemampuannya dalam kontrol posisi open-loop yang akurat, di mana setiap langkah motor berkorelasi langsung dengan jarak pergeseran kawat. Integrasi komponen mekanis seperti lead screw memastikan pergerakan jig pemandu berlangsung secara linear dan stabil di atas rel, seperti profil V-slot.

Komponen utama dalam sistem penggulungan otomatis ini meliputi unit mikrokontroler, *Driver* motor (seperti A4988 atau TB6600), motor stepper Nema 17, serta mekanisme transmisi daya berupa lead screw dan coupling. Selain itu, sistem sering dilengkapi dengan panel antarmuka pengguna (LCD dan keypad) untuk mengatur jumlah lilitan secara fleksibel. Dalam pengembangan yang lebih lanjut, sensor kecepatan atau penghitung pulsa dapat ditambahkan untuk memverifikasi putaran spindel secara real-time, memastikan bahwa hasil akhir sesuai dengan spesifikasi teknis yang direncanakan.

Keunggulan sistem penggulungan otomatis dibandingkan metode konvensional sangat signifikan, terutama dalam hal standarisasi kualitas.

Pemilihan Arduino Uno dalam penelitian ini didasarkan pada ketersediaan pin *Input/Output* (I/O) yang mencukupi untuk mengintegrasikan seluruh komponen pendukung sistem secara simultan. Mikrokontroler ini mampu menangani manajemen data yang kompleks, mulai dari menerima *Input* parameter operasional melalui Keypad, mengolah logika pergerakan presisi pada *Driver* Motor Stepper melalui sinyal digital dan PWM, hingga menyajikan informasi status proses secara real-time kepada pengguna melalui layar LCD 16x2. Efisiensi distribusi pin pada Arduino Uno memungkinkan sistem kontrol tetap kompak namun mampu menjalankan fungsi otomasi yang responsif dan akurat.

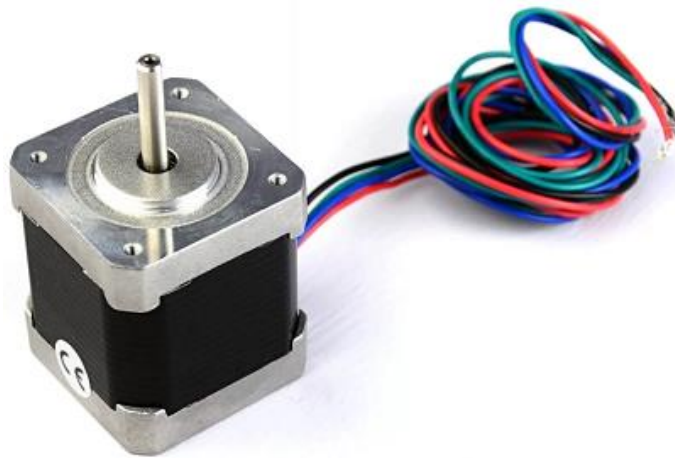
Arduino Uno dilengkapi dengan berbagai pin *Input/Output* (I/O) yang mendukung fleksibilitas desain sistem, dengan spesifikasi fungsi sebagai berikut:

1. Digital *Input/Output*: Memiliki 14 pin digital yang dapat dikonfigurasi untuk membaca sinyal logika (0 atau 1) maupun memberikan tegangan *Output* untuk mengaktifkan komponen seperti *Driver* motor.
2. PWM (Pulse Width Modulation): Terdapat 6 pin digital (ditandai dengan simbol ~) yang mampu menghasilkan sinyal gelombang lebar pulsa untuk mengendalikan perangkat yang membutuhkan variasi daya, seperti kecepatan motor atau posisi servo.
3. ADC (*Analog to Digital Converter*): Tersedia 6 saluran *Input* analog (A0-A5) dengan resolusi 10-bit yang berfungsi mengubah sinyal tegangan analog dari sensor menjadi nilai numerik digital.
4. Komunikasi Serial (UART): Memiliki sepasang pin khusus (RX dan TX) yang memungkinkan pertukaran data secara serial antara mikrokontroler dengan perangkat lain seperti komputer atau modul tambahan.
5. Protokol I2C dan SPI: Mendukung antarmuka komunikasi data bus untuk menghubungkan berbagai modul eksternal secara efisien, seperti layar LCD yang menggunakan modul I2C untuk menghemat penggunaan pin digital.

Tabel 2- 1 Spesifikasi *Arduino Uno*

Kategori	Spesifikasi
Mikrokontroler	ATmega328P (8-bit)
CPU	AVR 8-bit
Kecepatan Clock	16 MHz
Memori RAM	2 KB (SRAM)
Memori ROM	32 KB (Flash Memory) + 1 KB (EEPROM)
Konektivitas	UART, SPI, I2C (Wire)
GPIO	14 Pin Digital (6 mendukung PWM)
Tegangan Operasi	5 V
Arus Maksimum per Pin	20 mA (rekomendasi) / 40 mA (limit)
ADC (<i>Analog-to-Digital Converter</i>)	Memiliki 6 saluran <i>Input</i> analog (A0-A5) dengan resolusi 10-bit
PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	Tersedia pada 6 pin digital (3, 5, 6, 9, 10, dan 11) untuk kontrol aktuator analog.
SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>):	Mendukung komunikasi sinkron melalui pin 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), dan 13 (SCK)
I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>):	Mendukung komunikasi dua kabel melalui pin SDA dan SCL.
UART (<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>)	Tersedia satu jalur komunikasi serial melalui pin 0 (RX) dan 1 (TX).

2.2.3 Motor Stepper (Nema 17)



Gambar 2- 2 Nema 17

Motor stepper Nema 17 merupakan jenis motor sinkron brushless yang berfungsi mengubah energi pulsa listrik menjadi pergerakan mekanis diskrit yang disebut sebagai langkah (step). Berbeda dengan motor DC konvensional yang berputar secara kontinu, Nema 17 bergerak dalam inkremen sudut yang tetap, sehingga memungkinkan kontrol posisi dan kecepatan yang sangat akurat tanpa memerlukan sistem umpan balik (feedback loop) seperti sensor encoder.

Pemilihan Nema 17 dalam rancang bangun ini didasarkan pada kemampuannya untuk melakukan konversi gerak dari rotasi menjadi translasi secara presisi. Melalui poros motor yang dihubungkan ke mekanisme lead screw, setiap putaran sudut motor diterjemahkan menjadi pergeseran linier pada jig pemandu kawat. Hal ini sangat krusial dalam mesin *Wire Coiller* otomatis, di mana Nema 17 bertindak sebagai aktuator utama yang memastikan setiap lilitan kawat diletakkan pada posisi yang tepat sesuai diameter kawat nikelin yang digunakan. Kemampuan motor ini untuk berputar secara instan dan menahan posisi melalui holding torque (torsi penahan) sangat krusial untuk menjaga ketegangan kawat agar tidak kendur, sehingga menghasilkan koil dengan kerapatan seragam dan nilai resistansi yang akurat.

Dalam operasionalnya, Nema 17 tidak dihubungkan langsung ke mikrokontroler karena membutuhkan arus yang besar. Cara pemakaiannya melibatkan penggunaan *Driver* motor (A4988) sebagai perantara. *Driver* tersebut menerima sinyal step dan direction dari Arduino Uno untuk mengatur kecepatan serta arah putaran motor. Selain itu, motor ini dipasangkan dengan *Flexible Coupler* untuk menyambungkan poros motor ke lead screw, guna meredam getaran dan kompensasi ketidaksejajaran mekanis, sehingga pergerakan translasi jig berlangsung halus dan stabil.

Tabel 2- 2 Spesifikasi Nema 17

Step Angle	1,8° per step
Arus (Current per Phase)	antara 1,0 A hingga 2,0 A.
Tegangan (Rated Voltage)	12V - 24V
Tahanan (Resistance)	Sekitar 1,0 hingga 3,0 Ohm per fase
Holding Torque	3,2 kg-cm hingga 5,5 kg-cm (0,32 Nm - 0,55 Nm)

2.2.4 Lead Screw 8mm



Gambar 2- 3 Lead Screw

Lead screw atau sekrup penggerak adalah komponen transmisi daya mekanis yang berfungsi untuk mengubah gerak rotasi dari motor stepper menjadi gerak linier (translasional). Dalam rancang bangun mesin *Wire*

Coiller otomatis ini, lead screw bertindak sebagai poros penggerak utama bagi mekanisme jig pemandu kawat. Pemilihan diameter 8mm didasarkan pada keseimbangan antara kekuatan mekanis dalam menahan beban dan kepresisian pergeseran yang dibutuhkan. Komponen ini dipilih dengan panjang 70 cm guna memberikan jangkauan area kerja yang luas, sehingga memungkinkan mesin untuk memproduksi koil nikelin dengan dimensi panjang yang bervariasi sesuai kebutuhan.

Prinsip kerja lead screw ini bergantung pada interaksi antara ulir baut dengan nut (mur) yang terpasang pada jig. Ketika motor stepper Nema 17 berputar, lead screw akan ikut berputar dan memaksa nut bergerak maju atau mundur sepanjang sumbu linier. Dalam sistem ini, lead screw berfungsi sebagai mitra mekanis bagi Nema 17 untuk memastikan konversi energi dari rotasi menjadi translasi berjalan secara konsisten dan sinkron. Keunggulan utama dari penggunaan lead screw dibandingkan sistem sabuk (belt) adalah kemampuannya untuk menahan posisi secara mekanis dan memberikan torsi yang lebih besar pada kecepatan rendah, yang sangat penting untuk memastikan kawat nikelin tergulung dengan kerapatan yang konsisten di setiap lapisan koil.

Tabel 2- 3 Spesifikasi Lead Screw

Material	Stainless Steel (Screw) & Brass/Tembaga (Nut)
Diameter Luar	8 mm
Pitch (Jarak Ulir)	2 mm
Lead (Jarak per Putaran)	8 mm (untuk tipe <i>4-start</i>)
Konektivitas	Dihubungkan ke Motor via Coupler Flexible (5mm ke 8mm)

2.2.5 Coupler Flexible (5mm ke 8mm)



Gambar 2- 4 Coupler Flexible

Coupler flexible adalah komponen mekanis yang berfungsi sebagai penghubung antara dua poros (shaft) yang berputar untuk mentransmisikan torsi dari satu titik ke titik lainnya. Dalam rancang bangun mesin *Wire Coiller* otomatis ini, coupler memiliki peran krusial sebagai jembatan transmisi daya yang menghubungkan poros motor stepper Nema 17 berdiameter 5mm dengan poros lead screw sepanjang 70 cm yang berdiameter 8mm. Penggunaan tipe flexible (fleksibel) sangat penting dibandingkan tipe rigid (kaku) karena kemampuannya untuk mengompensasi ketidaksejajaran (*misalignment*) kecil yang mungkin terjadi selama proses perakitan mekanik pada rangka yang panjang.

Kehadiran komponen ini secara langsung mendukung kinerja Nema 17 dalam mengubah gerak rotasi menjadi translasi pada lead screw. Tanpa adanya coupler flexible, getaran dari motor atau sedikit penyimpangan sudut terhadap lead screw sepanjang 70 cm tersebut dapat menyebabkan beban berlebih pada bantalan (bearing) motor. Hal ini berisiko memicu panas berlebih (*overheat*) atau kemacetan pada pergerakan linier jig pemandu kawat. Selain itu, material aluminium pada coupler ini memberikan keseimbangan antara bobot yang ringan dan kekuatan torsi yang cukup untuk memastikan perputaran lead screw tetap stabil dan presisi, sehingga kerapatan kawat nikelin yang dihasilkan tetap konsisten.

2.2.6 Power Supply 12V 5A



Gambar 2- 5 Power Supply

Adaptor 12V 5A adalah unit catu daya eksternal yang berfungsi mengonversi tegangan bolak-balik (Alternating Current/AC) dari sumber jala-jala listrik PLN (220V) menjadi tegangan searah (Direct Current/DC) yang stabil. Dalam rancang bangun mesin *Wire Coiller* otomatis ini, adaptor bertindak sebagai sumber energi utama yang mensuplai daya ke mikrokontroler Arduino Uno dan, yang paling krusial, memberikan daya bagi motor stepper Nema 17 melalui *Driver* motor.

Pemilihan spesifikasi arus sebesar 5 Ampere didasarkan pada perhitungan kebutuhan total daya sistem agar terhindar dari kondisi drop voltage. Motor stepper Nema 17 umumnya memerlukan arus yang cukup besar untuk mempertahankan holding torque saat menarik kawat nikelin. Dengan kapasitas 5A, adaptor ini memiliki cadangan daya (headroom) yang cukup untuk menjalankan motor secara kontinu sekaligus menghidupi komponen pendukung lainnya tanpa risiko overheating pada perangkat catu daya.

Tabel 2- 4 Spesifikasi Power Supply

Jenis Perangkat	Power Supply
Tegangan <i>Input</i>	100V – 240V AC (50/60 Hz)

Tegangan <i>Output</i>	12V DC
Arus <i>Output</i> Maksimum	5 Ampere (60 Watt)
Konektivitas	DC Jack 5.5mm x 2.1mm

2.2.7 Step Down LM2596



Gambar 2- 6 Step Down

Sistem regulasi daya pada alat ini menggunakan modul Step Down LM2596 untuk menurunkan tegangan dari sumber utama 12V DC menjadi tegangan kerja yang optimal bagi mikrokontroler. Pemilihan modul berbasis switching ini didasarkan pada tingkat efisiensi transformasinya yang tinggi (mencapai 92%) dibandingkan regulator linear konvensional, sehingga meminimalisir disipasi panas yang berlebih pada sistem. Dalam implementasinya, potensiometer pada modul diatur secara presisi untuk menghasilkan keluaran konstan sebesar 5V DC yang disalurkan melalui pin VIN pada Arduino Uno.

Penggunaan tegangan 5 VDC melalui modul LM2596 ini merupakan langkah preventif untuk menjaga stabilitas operasional mikrokontroler. Dengan menurunkan tegangan menjadi 5 VDC sebelum masuk ke regulator

internal Arduino, beban kerja termal pada komponen regulator on-board Arduino dapat dikurangi secara signifikan dibandingkan jika menggunakan *Input* 12 VDC secara langsung. Hal ini memastikan bahwa seluruh komponen logika, termasuk LCD dan Keypad, mendapatkan suplai daya yang stabil dan terlindungi dari fluktuasi tegangan maupun derau (noise) yang mungkin dihasilkan oleh aktivitas motor stepper pada jalur daya utama.

Tabel 2- 5 Spesifikasi Step Down

Komponen	LM2596 (Buck Converter)
Metode Kerja	Switching (On-Off Frekuensi Tinggi)
Efisiensi	Tinggi (Hingga 92%)
Disipasi Panas	Sangat Rendah (Tetap dingin)
Arus Maksimal	Hingga 3 Ampere
Fleksibilitas	Tegangan <i>Output</i> dapat diatur (<i>Adjustable</i>)
Ukuran	Modul lengkap (Siap pakai)

2.2.8 Driver Stepper A4988



Gambar 2- 7 Driver Stepper

Pada sistem penggerak utama, digunakan modul *Driver* motor *stepper* A4988 yang berperan sebagai pengendali fasa arus dan eksekutor langkah untuk motor *stepper* Nema 17. Pemilihan *Driver* A4988 ini didasarkan pada keandalannya dalam menangani beban kerja linier secara konstan serta kemudahan konfigurasinya pada sistem mikrokontroler. Modul A4988

memiliki kemampuan *microstepping* internal yang dikonfigurasi pada mode 1/16 step. Hal ini membuat variabel resolusi langkah pada program (StepsPerRevolution) berada pada angka 3.200 pulsa per putaran. Resolusi ini sangat krusial dalam mekanisme *lead screw* T8 pada alat *Wire Coiller* nikelin ini, karena pergerakan translasi *body jig* pengarah kawat berdiameter 0,3 mm dapat berjalan secara halus, rapat, dan konsisten guna mencapai target nilai resistansi variabel koil yang akurat.

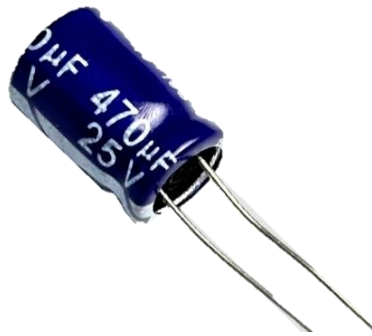
Selain keunggulan pada aspek akurasi pergerakan, modul A4988 telah dilengkapi dengan fitur proteksi internal berupa *Thermal Shutdown* (TSD) dan *Overcurrent Protection* yang mampu mengamankan sirkuit dari kerusakan akibat suhu berlebih atau lonjakan arus induktif. Secara teknis, komponen ini ditempatkan di dalam box dan diintegrasikan langsung dengan Arduino Uno R3 melalui pin digital D3 untuk sinyal langkah (STEP) serta pin D2 untuk kontrol arah putaran (DIR). Modul ini menerima suplai tegangan logika 5V DC dari *buck converter* LM2596 pada pin VDD, serta mendapatkan suplai daya motor utama sebesar 12V 5A dari *Switching Power Supply* pada pin VMOT. Jalur daya utama tersebut juga ditambahkan komponen Kapasitor Elco 470 μ F secara paralel yang dipasang sedekat mungkin dengan pin suplai *Driver* guna menyerap fluktuasi arus (*voltage spikes*). Penggunaan *Driver* A4988 yang dikombinasikan dengan algoritma perubahan kecepatan otomatis ini menjamin sistem otomasi mekanik dapat bekerja secara stabil dengan efisiensi biaya komponen yang optimal.

Tabel 2- 6 Spesifikasi *Driver Stepper*

Parameter Teknis	Nilai / Spesifikasi	Keterangan
Tegangan <i>Input</i> (VM)	8V – 35V DC	Mendukung penuh <i>Power Supply</i> 12V.
Tegangan Logika (VIO)	3V – 5.5V DC	Kompatibel dengan level sinyal Arduino Uno.
Arus Fase Maksimum	1.0A (RMS) / 2.0A (Peak)	Mampu menggerakkan Nema 17 dengan torsi tinggi.
Resolusi <i>Microstepping</i>	Up to 1/16	Mendukung pengaturan Full, 1/2, 1/4, 1/8, dan

		1/16 step lewat pin logika MS1, MS2, MS3
Hambatan Internal (RDS(on))	0.32 Ω (LS & HS)	Disipasi daya standar dengan sirkuit proteksi termal internal untuk menjaga stabilitas chip.
Teknologi Arus	Automatic Current Decay	Pengaturan otomatis mode peluruhan arus untuk mengoptimalkan efisiensi motor.
Interface Komunikasi	Step/Dir	Kontrol pergerakan yang sangat sederhana, hanya membutuhkan dua pin digital utama dari program.

2.2.9 Kapasitor 470 μ F/25V



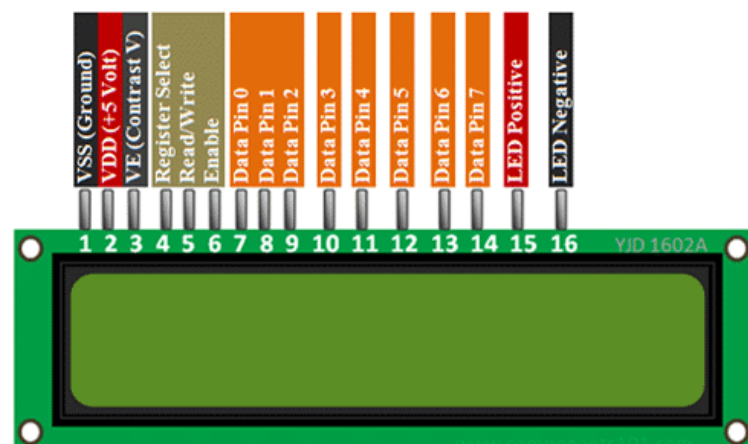
Gambar 2- 8 Kapasitor

Dalam perancangan sistem distribusi daya alat *Wire Coiller* nikelin ini, dipasang sebuah komponen Bulk Capacitor jenis elektrolit dengan spesifikasi 470 μ F / 25V yang ditempatkan secara paralel pada jalur masukan daya utama motor stepper. Tujuan utama dari pemasangan kapasitor ini adalah untuk berfungsi sebagai penyimpan energi sementara (energy reservoir) yang mampu menyuplai kebutuhan arus instan saat motor stepper melakukan transisi langkah (stepping) atau perubahan beban mekanis secara mendadak. Hal ini sangat krusial mengingat karakteristik motor stepper yang bersifat induktif seringkali menimbulkan lonjakan permintaan arus

yang dapat mengakibatkan penurunan tegangan sesaat (voltage dip) pada jalur utama.

Manfaat teknis dari penggunaan kapasitor 470 μ F ini mencakup proteksi terhadap komponen sensitif dan peningkatan akurasi sistem. Dengan adanya kapasitor ini, fluktuasi tegangan dan noise frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh proses switching pada *Driver* dapat diredam secara efektif, sehingga mencegah gangguan elektromagnetik yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan pada logika Arduino Uno. Selain itu, kapasitor ini berperan penting dalam menyerap lonjakan tegangan balik (back-EMF) yang muncul saat motor berhenti secara tiba-tiba, sehingga melindungi unit *Driver* motor dari kerusakan akibat kelebihan tegangan (overvoltage). Secara keseluruhan, integrasi kapasitor ini menjamin stabilitas pasokan daya yang dibutuhkan untuk menjaga ketepatan jumlah putaran motor, yang pada akhirnya menentukan konsistensi kerapatan lilitan dan akurasi nilai resistansi koil nikelin yang dihasilkan.

2.2.10 LCD 16x2



Gambar 2- 9 LCD 16x2

LCD 16x2 adalah modul tampilan elektronik yang berfungsi sebagai antarmuka komunikasi visual (Human Machine Interface) antara sistem mikrokontroler dengan pengguna. Panel ini memiliki kapasitas untuk menampilkan 32 karakter yang terbagi dalam dua baris, di mana setiap baris mampu menampung 16 karakter. Dalam perancangan mesin *Wire Coiller*

otomatis, LCD 16x2 berperan vital untuk menyajikan informasi operasional secara real-time, seperti jumlah lilitan yang telah selesai, status pergerakan motor, dan parameter *Input* yang sedang diatur oleh pengguna.

Teknologi kristal cair pada modul ini memungkinkan tampilan data teks yang jelas dengan konsumsi daya yang relatif rendah. Penggunaan LCD ini mempermudah proses pemantauan fungsionalitas alat, sehingga pengguna dapat memastikan bahwa proses penggulungan kawat nikelin berjalan sesuai dengan target lilitan yang telah diprogramkan sebelumnya di dalam mikrokontroler.

Tabel 2- 7 Spesifikasi LCD 16x2

Jenis Tampilan	STN, Reflective/Transflective
Tegangan Operasi	4.7 V – 5.3 V (Standar 5V)
Arus Operasi	1.0 mA – 1.5 mA (Tanpa <i>Backlight</i>)
Konektivitas	4-bit / 8-bit <i>Parallel Interface</i> (atau I2C via modul)
Kontroler Internal	HD44780 atau setara

Tabel 2- 8 Konfigurasi Pin-Out LCD 16x2

Pin	Nama	Fungsi
1	VSS	Ground (GND)
2	VDD	Suplai Tegangan +5V
3	VO	Pengaturan Kontras Tampilan (via Potensiometer)
4	RS	Register Select (Instruksi/Data)
5	RW	Read/Write (Umumnya dihubungkan ke GND)
6	E	Enable (Mengaktifkan pengiriman data)
7-14	D0-D7	Bus Data (D4-D7 digunakan pada mode 4-bit)
15	A (Anode)	Backlight Positif (+5V)

16	K (Cathode)	Backlight Negatif (GND)
----	-------------	-------------------------

2.2.11 Key Pad



Gambar 2- 10 Keypad 4x4

Keypad 4x4 adalah perangkat *Input* numerik dan kontrol yang berfungsi sebagai media interaksi bagi pengguna untuk memasukkan parameter tertentu ke dalam sistem mikrokontroler. Dalam perancangan mesin *Wire Coiller* otomatis ini, keypad digunakan untuk mengatur variabel *Input* seperti jumlah lilitan kawat yang diinginkan, kecepatan putar motor, atau untuk memulai (start) dan menghentikan (emergency stop) proses operasional.

Sesuai namanya, keypad ini mengadopsi sistem matriks yang terdiri dari 16 tombol yang disusun dalam 4 baris dan 4 kolom. Penggunaan sistem matriks ini sangat efisien dalam manajemen pin mikrokontroler; untuk mengoperasikan 16 tombol, Arduino hanya memerlukan 8 pin I/O (4 baris dan 4 kolom), bukan 16 pin individu. Mikrokontroler bekerja dengan cara memindai (scanning) setiap baris dan kolom secara bergantian untuk mendeteksi koordinat tombol mana yang ditekan oleh pengguna.

Tabel 2- 9 Konfigurasi Pin-Out Key Pad

Pin Keypad (1-8)	Fungsi	Keterangan
Pin 1	Baris 1 (R1)	Tombol 1, 2, 3, A
Pin 2	Baris 2 (R2)	Tombol 4, 5, 6, B
Pin 3	Baris 3 (R3)	Tombol 7, 8, 9, C
Pin 4	Baris 4 (R4)	Tombol *, 0, #, D
Pin 5	Kolom 1 (C1)	Tombol 1, 4, 7, *
Pin 6	Kolom 2 (C2)	Tombol 2, 5, 8, 0
Pin 7	Kolom 3 (C3)	Tombol 3, 6, 9, #
Pin 8	Kolom 4 (C4)	Tombol A, B, C, D

2.2.12 V-Slot Aluminium Profile 2040



Gambar 2- 11 V-Slot Aluminium Profile

V-Slot *Aluminium Profile* adalah sistem kerangka struktural modular yang terbuat dari paduan aluminium ekstrusi (umumnya seri 6063-T5). Berbeda dengan profil aluminium standar (T-Slot), V-Slot memiliki lekukan berbentuk huruf "V" pada keempat sisinya yang dirancang khusus sebagai lintasan bagi roda pemandu (V-Wheels). Dalam rancang bangun alat *Wire Coiller* otomatis ini, komponen ini digunakan dengan spesifikasi panjang 70 cm, di mana profil ini berfungsi ganda sebagai rangka utama yang memberikan rigiditas pada mesin sekaligus sebagai rel presisi untuk pergerakan linier jig pemandu kawat.

Berdasarkan karakteristik fisiknya, profil aluminium yang digunakan memiliki massa jenis linier sebesar 15 gram per sentimeter (15 g/cm), sehingga untuk panjang keseluruhan 70 cm diperoleh berat total struktur sekitar 1 kg (setelah akumulasi pembulatan material/komponen penyangga terkait). Penggunaan V-Slot dengan spesifikasi ini memberikan keunggulan dalam hal stabilitas mekanis dan kemudahan perakitan. Karena kawat nikelin memerlukan tegangan tertentu saat digulung, kerangka aluminium yang kokoh ini menjamin bahwa seluruh komponen mekanis tetap berada pada posisi sejajar (*alignment*) dan tidak mengalami defleksi (pembengkokan). Selain itu, permukaan aluminium yang telah melalui proses anodisasi memberikan ketahanan terhadap korosi serta meminimalisir gesekan pada komponen roda yang bergerak maju dan mundur di atasnya.

2.2.13 Roda Openbuilds V-wheel Stainless 255zz



Gambar 2- 12 Roda Openbuilds

Roda V-Wheel Openbuilds adalah komponen mekanis presisi yang dirancang khusus untuk bekerja secara selaras dengan profil aluminium V-Slot. Komponen ini berfungsi sebagai bantalan gelinding (*rolling element*) yang memungkinkan jig pemandu kawat bergerak meluncur di sepanjang rel aluminium. Dalam mesin *Wire Coiller* otomatis, V-Wheel bertindak

sebagai penghubung antara platform yang bergerak dengan kerangka statis, memastikan pergerakan linier berlangsung dengan hambatan gesek yang minimal.

Pemilihan varian Stainless Steel atau polimer keras pada roda ini bertujuan untuk mendapatkan durabilitas tinggi dan stabilitas dimensi. Roda ini memiliki profil berbentuk "V" pada bagian luarnya yang masuk secara sempurna ke dalam alur profil V-Slot. Penggunaan roda ini sangat krusial untuk menjaga agar jig pemandu kawat tetap stabil, tidak bergoyang (wobble), dan memiliki tingkat repetisibilitas yang tinggi saat motor stepper melakukan pergerakan bolak-balik untuk membentuk lilitan kawat nikelin.

2.2.14 Analisis Perhitungan

Analisis perhitungan merupakan bagian penting dalam landasan teori yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja, akurasi, dan ketepatan sistem *Wire Coiller* otomatis secara kuantitatif. Melalui analisis ini, perbedaan antara parameter masukan (target) pada *keypad* dengan hasil pengukuran fisik aktual dapat dinyatakan dalam bentuk parameter numerik yang terukur. Pendekatan kuantitatif diperlukan untuk memberikan gambaran objektif mengenai tingkat kesalahan (*error*), ketelitian (presisi), dan konsistensi dari sistem penggulung kawat nikelin yang dirancang.

Dalam konteks alat *Wire Coiller* otomatis dengan kendali *Open Loop*, analisis perhitungan ini digunakan untuk menilai kemampuan sistem mekanis *lead screw* dan motor *stepper* dalam mengeksekusi perintah lilitan. Evaluasi dilakukan dengan menguji akurasi perolehan nilai resistansi akhir koil (melalui pengukuran multimeter) terhadap nilai *Input* resistansi target. Selain aspek kelistrikan, analisis ini juga mencakup parameter dimensi mekanis, seperti kesesuaian jumlah putaran motor *stepper*, kebutuhan panjang kawat yang digunakan, serta panjang koil resistansi akhir saat dikeluarkan dari *lead screw*.

Parameter statistik dan metrik kesalahan digunakan sebagai alat bantu untuk mengevaluasi seberapa besar penyimpangan (*error*) maupun slip mekanis yang terjadi selama proses kerja sistem berlangsung. Beberapa

metode analisis yang diterapkan dalam evaluasi kerja sistem ini meliputi *Mean Square Error* (MSE), persentase kesalahan (*percentage error*), serta standar deviasi. Masing-masing metode memiliki fungsi spesifik untuk menggambarkan tingkat akurasi pembacaan, akumulasi *error* kuadrat, serta tingkat repetisibilitas atau kestabilan alat dalam memproduksi koil secara berulang.

2.2.14.1 Coefficient of Variation (CV)

Koefisien variasi merupakan salah satu metrik statistik yang digunakan untuk mengukur tingkat presisi dan konsistensi suatu sistem dengan membandingkan nilai standar deviasi terhadap nilai rata-rata dari sekumpulan data hasil pengujian berulang. Berbeda dengan metrik variansi mutlak, Koefisien Variasi menyajikan nilai sebaran data dalam bentuk rasio relatif terhadap nilai rata-ratanya, sehingga lebih mudah diinterpretasikan dalam menentukan kualitas stabilitas serta keterulangan performa suatu alat pengujian. Secara matematis, Koefisien Variasi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2-1)$$

Dengan:

- S = Nilai standar deviasi dari sampel pengukuran berulang.
- $\bar{X}$ = Nilai rata-rata dari hasil pengukuran fisik atau hasil kerja sistem.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa Koefisien Variasi diperoleh dari pembagian antara nilai standar deviasi dengan nilai rata-rata sampel, kemudian dikalikan seratus persen. Semakin kecil nilai CV yang dihasilkan (mendekati 0%), maka semakin tinggi tingkat presisi dan konsistensi sistem dalam menghasilkan output yang seragam pada setiap percobaan. Sebaliknya, nilai CV yang besar mengindikasikan adanya fluktuasi mekanis, gangguan luar, ataupun variabilitas hasil kerja yang tinggi pada sistem kendali.

Dalam konteks alat *Wire Coiler* nikelin otomatis dengan kendali *Open Loop*, Koefisien Variasi digunakan untuk mengevaluasi dua aspek utama secara kuantitatif, yaitu presisi kelistrikan dan presisi dimensi mekanis. Pada aspek kelistrikan, Koefisien Variasi digunakan untuk menilai konsistensi nilai resistansi akhir koil nikelin (Ohm) dari beberapa kali pengulangan pembuatan pada target yang sama setelah diukur menggunakan multimeter. Sementara itu, pada aspek mekanis, metrik ini diaplikasikan untuk menganalisis keterulangan jumlah putaran motor stepper yang terbentuk, kebutuhan panjang kawat nikelin yang terpakai, serta panjang fisik koil resistansi akhir saat dikeluarkan dari *lead screw*. Melalui analisis Koefisien Variasi ini, tingkat presisi alat dapat ditentukan secara objektif untuk memastikan koil resistansi yang diproduksi memiliki uniformitas yang sesuai dengan standar komponen kelistrikan industri.

2.2.14.2 Standar Deviasi

Standar deviasi merupakan ukuran statistik yang digunakan untuk menentukan tingkat sebaran data dalam suatu sampel, serta seberapa dekat titik data individu dengan nilai rata-rata (*mean*) dari sampel tersebut. Dalam bidang rekayasa dan pengujian sistem, standar deviasi digunakan sebagai metrik utama untuk mengevaluasi tingkat presisi, stabilitas, dan repetisibilitas (kemampuan mengulang hasil) dari suatu alat ukur atau mekanisme kerja. Berbeda dengan metrik kesalahan yang mengukur kedekatan dengan nilai target, standar deviasi fokus pada konsistensi variasi data ketika pengujian dilakukan berulang kali pada kondisi yang sama. Secara matematis, persamaan standar deviasi sampel dinyatakan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2-2)$$

Dengan:

- S = Standar deviasi sampel
- X_i = Nilai data pengamatan atau pengukuran ke

- $\bar{X}$ = Nilai rata-rata (*mean*) dari keseluruhan data pengamatan
- n = Jumlah total sampel atau pengujian yang dilakukan

Persamaan di atas menunjukkan bahwa standar deviasi diperoleh dari akar kuadrat dari varians, di mana selisih setiap titik data dengan nilai rata-rata dikuadratkan terlebih dahulu agar nilai negatif tidak saling menghilangkan. Semakin kecil nilai standar deviasi (mendekati nol), maka semakin rapat sebaran data pengukuran yang menandakan bahwa sistem memiliki tingkat presisi dan stabilitas mekanis yang sangat tinggi. Sebaliknya, nilai standar deviasi yang besar menunjukkan bahwa sistem tidak stabil dan menghasilkan *Output* yang fluktuatif meskipun diberikan nilai masukan yang sama.

Dalam konteks alat *Wire Coiller* nikelin otomatis dengan kendali *Open Loop*, standar deviasi menjadi parameter yang sangat krusial untuk menguji keandalan sistem tanpa sensor umpan balik tersebut. Metrik ini digunakan untuk menganalisis konsistensi dimensi mekanis koil yang diproduksi melalui pengujian berulang pada nilai *Input* resistansi (*keypad*) yang sama. Parameter fisik yang dievaluasi menggunakan standar deviasi meliputi kestabilan jumlah putaran yang dieksekusi motor *stepper*, konsistensi kebutuhan panjang kawat nikelin yang terpakai, serta variasi dimensi panjang koil resistansi akhir saat dikeluarkan dari *lead screw*. Melalui analisis standar deviasi ini, dapat diketahui seberapa besar pengaruh celah mekanis (*backlash*), slip pada motor *stepper*, atau faktor eksternal lainnya terhadap konsistensi kualitas koil resistansi yang dihasilkan oleh alat.