

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Setelah penulis mencari beberapa referensi yang telah dipublikasikan sebelumnya, terdapat beberapa referensi yang dinilai penulis memiliki kemiripan dengan alat yang dirancang. Namun, penulis menambahkan pengembangan sehingga terdapat perbedaan pada tugas akhir ini dibandingkan referensi sebelumnya :

1. Supriyati et al. (2023) dalam artikelnya yang berjudul “Rancang Bangun CNC (Computer Numerical Control) untuk Pembuatan PCB Berbasis Arduino” yang diterbitkan dalam Jurnal ORBITH Vol. 19 No. 2, merancang mesin CNC untuk pencetakan jalur PCB tanpa menggunakan bahan kimia. Sistem yang dikembangkan menggunakan Arduino Uno sebagai mikrokontroler utama dan driver A4988 untuk menggerakkan motor stepper NEMA 17. Proses konversi desain file Gerber menjadi G-Code dilakukan dengan perangkat lunak FlatCAM dan Candle. Selain itu, sistem dilengkapi tiga tombol kontrol tambahan, yaitu abort, hold, dan resume. Mesin ini menggunakan mata potong V-bit dengan sudut 10° dan ujung 0,1 mm serta motor spindle DC berkecepatan 6000 rpm. Hasil pengujian menunjukkan tingkat ketelitian yang tinggi dengan rata-rata kesalahan 0,86% pada sumbu X, 0,95% pada sumbu Y, dan 1,3% pada sumbu Z.
2. Hasibuan et al. (2019) dalam penelitiannya yang dipublikasikan dalam Jurnal TEKTRON Vol. 3 No. 1 merancang mesin CNC milling 3-axis untuk proses engraving jalur PCB berbasis Arduino Uno. Sistem ini menggunakan mikrokontroler Arduino Uno untuk mengendalikan motor stepper NEMA 23 pada sumbu X, Y, dan Z dengan bantuan driver TB6560 dan catu daya 24V. Desain PCB dibuat menggunakan perangkat lunak Eagle, sedangkan Universal G-Code Sender (UGS) digunakan sebagai antarmuka kontrol CNC. Mesin ini menggunakan mata bor tipe single left berdiameter 1 mm, dan pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan jalur

dengan ketelitian tinggi pada material PCB, dengan kecepatan spindle mencapai 5000 rpm.

3. Irawan Malik et al. (2019) dalam artikelnya yang dipublikasikan pada Jurnal Teknik Vol. 13 No. 1 merancang dan menguji prototipe mesin CNC engraver mini sebagai alat bantu pembelajaran. Mesin ini dirancang untuk dapat mengukir berbagai material seperti PCB, kayu, dan akrilik. Desain mekanik dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks dengan sistem penggerak menggunakan ball screw untuk meminimalkan gesekan. Sistem kontrol dijalankan dengan perintah G-Code, serta menggunakan motor stepper NEMA 17 pada sumbu gerak dan motor spindle DC 775 24V dengan kecepatan 7000 rpm serta mata bor 3 mm. Mesin ini memiliki keunggulan dari segi efisiensi biaya dan fleksibilitas, sehingga cocok digunakan dalam pembelajaran CAD/CAM.

Berdasarkan berbagai referensi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan mesin CNC PCB yang lebih akurat dengan menggunakan perangkat lunak Eagle sebagai alat desain PCB, FlatCAM untuk memproses jalur CNC, serta *Universal G-Code Sender (UGS)* sebagai pengirim perintah ke mesin.

Sistem ini menggunakan motor stepper NEMA 17 yang dikendalikan oleh *driver* TMC2209 dengan konfigurasi *microstepping* 1/16 untuk meningkatkan ketelitian gerak. Mesin juga dilengkapi dengan motor spindle DC 775 berkecepatan 12.000 rpm dan mata bor *V-bit* 30° dengan ujung berdiameter 0,1 mm serta *end mill* 0,8 mm. Selain itu, ditambahkan layar indikator LCD pada panel kontrol untuk memudahkan pemantauan saat pengoperasian.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Mesin CNC (Computer Numerical Control)



Gambar 2.1 Mesin CNC

(Sumber : indotech-group.co.id)

Mesin CNC (*Computer Numerical Control*) adalah jenis mesin perkakas yang dioperasikan secara otomatis menggunakan instruksi digital. Instruksi ini berbentuk program yang terdiri dari kombinasi huruf dan angka, yang dikenal sebagai G-Code. Program ini dimasukkan ke dalam sistem komputer yang terhubung dengan mesin.

Komputer pada mesin CNC memiliki beberapa fungsi penting, seperti menyimpan data, membuat serta mengedit program, dan menjalankan proses produksi. Mesin ini bekerja dengan membaca dan menjalankan G-Code yang telah dibuat oleh seorang programmer CNC. G-Code berisi serangkaian perintah numerik yang mengatur gerakan mesin secara presisi.

Melalui perintah-perintah tersebut, sistem komputer mengendalikan pergerakan komponen mesin, terutama sepanjang sumbu X, Y, dan Z, sehingga perkakas di dalam mesin dapat memotong, mengebor, atau membentuk bahan kerja sesuai desain yang diinginkan. Proses ini memungkinkan produksi yang sangat akurat dan konsisten secara otomatis, tanpa perlu campur tangan manusia secara langsung selama proses pemesinan berlangsung. Jenis-jenis mesin CNC :

1. Mesin CNC Bubut (CNC Lathe)

Mesin ini digunakan untuk mengolah material berbentuk silinder. Selama proses kerja, benda kerja akan berputar dengan kecepatan tertentu, sementara pahat potong diam dan perlahan mengikis permukaan material sesuai bentuk yang telah diprogram.

2. Mesin CNC Milling

Mesin CNC milling berfungsi untuk mengerjakan benda kerja berbentuk balok atau datar. Dalam prosesnya, benda kerja dijepit di meja mesin, sementara alat potong (cutter) berputar dan bergerak mengikuti jalur yang telah diprogram untuk membentuk objek sesuai desain.

3. Mesin CNC Router

Jenis mesin ini biasa digunakan untuk memotong atau mengukir material non-logam seperti kayu, plastik, atau akrilik. Mesin ini bekerja dengan membaca program digital yang mengatur pola potongan, sehingga menghasilkan bentuk yang presisi dan rapi.

4. Mesin CNC Plasma Cutter

Merupakan mesin yang digunakan untuk memotong material logam atau kayu secara dua dimensi (flat). Mesin ini menggunakan plasma torch atau obor plasma, yang memanfaatkan gas bertekanan tinggi dan energi listrik untuk memotong material. Dibandingkan mesin router, mesin ini membutuhkan daya listrik yang lebih rendah.

5. Mesin CNC Laser Cutter

Mesin ini menggunakan teknologi pemotongan dengan sinar laser berkekuatan tinggi. Laser dipandu oleh komputer untuk mengikuti jalur potong yang telah diprogram. Mesin ini umum digunakan dalam industri manufaktur untuk memotong berbagai material seperti logam tipis, plastik, atau kayu dengan tingkat akurasi tinggi.

6. Mesin CNC 3D Printer

Merupakan mesin pencetak objek tiga dimensi (3D) berdasarkan desain digital. Mesin ini menyusun material secara bertahap (layer by layer) hingga membentuk benda padat. Material yang digunakan bisa berupa plastik, logam, atau bahkan kayu yang telah diproses khusus.

7. Mesin CNC Pick and Place

Mesin ini dirancang untuk perakitan komponen elektronik dengan sangat presisi dan kecepatan tinggi. Dilengkapi dengan beberapa nozzle kecil, mesin ini mengambil komponen elektronik mikro, lalu meletakkannya di posisi yang tepat pada papan sirkuit. Umumnya digunakan dalam pembuatan motherboard, ponsel, dan perangkat elektronik lainnya.

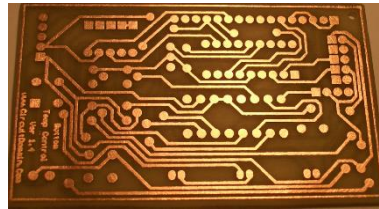
8. Mesin CNC Bending

Mesin ini digunakan untuk menekuk atau membentuk material menjadi sudut tertentu. Terdapat berbagai jenis mesin CNC bending seperti untuk pelat logam (plate), pipa (pipe), dan kawat (wire). Setiap jenis mesin bending disesuaikan dengan karakteristik dan bentuk material yang akan ditekuk.

Mesin CNC PCB termasuk dalam kategori mesin CNC router atau CNC milling berukuran kecil yang dirancang khusus untuk pembuatan papan sirkuit

cetak (PCB). Mesin ini bekerja dengan memotong, mengukir jalur tembaga, serta melubangi papan PCB sesuai desain yang telah diprogram. Dengan tingkat presisi yang tinggi, mesin ini mampu menggantikan proses etching manual, sehingga lebih efisien dan menghasilkan hasil yang lebih akurat.

2.2.2. PCB (Printed Circuit Board)



Gambar 2.2 PCB (Printed Circuit Board)

(Sumber : proactiveeducation.com)

PCB (*Papan Sirkuit Cetak*) adalah papan dasar yang digunakan untuk menyusun dan menghubungkan komponen elektronik melalui jalur tembaga sebagai penghantar arus listrik. PCB umumnya terbuat dari bahan isolator seperti FR4, yaitu material berbasis *fiberglass* yang dilapisi resin epoksi, serta Pertinax, yaitu bahan yang terbuat dari kertas yang diresapi resin fenolik.

PCB (Papan Sirkuit Cetak) dapat terdiri dari satu, dua, atau banyak lapisan. PCB satu lapis umum dipakai dalam perangkat elektronik sederhana seperti alat rumah tangga, sedangkan PCB dua lapis dan multilapis digunakan pada perangkat yang lebih kompleks seperti dashboard mobil, lampu LED, kartu grafis, dan motherboard karena memungkinkan kepadatan rangkaian yang lebih tinggi. Struktur utama PCB meliputi :

1. Substrat : Lapisan dasar yang biasanya terbuat dari bahan isolasi seperti FR-4 (*fiberglass*) atau plastik fleksibel untuk kebutuhan ruang dan ketahanan suhu tinggi.
2. Lapisan Konduktif : Umumnya berupa tembaga tipis yang menghantarkan arus listrik. Jumlah lapisan disesuaikan dengan jenis PCB (satu, dua, atau multilapis).

3. Masker Solder : Lapisan pelindung non-konduktif yang menutupi jalur tembaga dan memberi warna khas (biasanya hijau).
4. Sablon (Silkscreen) : Pelabelan berupa huruf, angka, atau simbol untuk menandai fungsi-fungsi titik koneksi pada PCB.

Lalu pada papan sirkuit cetak (PCB), terdapat dua jenis utama komponen elektronik berdasarkan metode pemasangannya, yaitu:

1. PTH (Plated Through Hole)

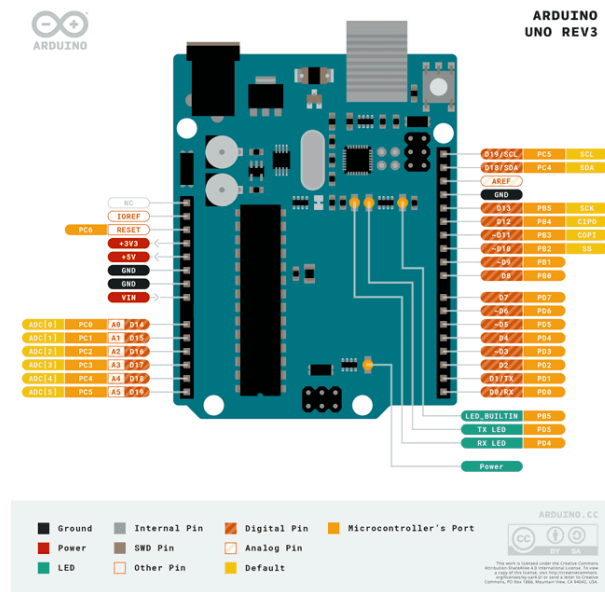
PTH adalah jenis desain PCB yang memiliki lubang berlapis tembaga (*plated*) yang memungkinkan kaki (*lead*) komponen menembus papan dan disolder di sisi bawahnya. Komponen yang digunakan dalam desain PTH biasanya menggunakan metode *Through Hole Technology (THT)*, yaitu teknik pemasangan komponen dengan memasukkan pin melalui lubang pada PCB dan menyoldernya di sisi sebaliknya. Metode ini umum digunakan pada rangkaian yang membutuhkan kekuatan mekanis tinggi atau arus besar, seperti resistor daya, kapasitor besar, dan konektor.

2. SMD (Surface Mount Device)

Komponen SMD tidak memiliki kaki panjang, melainkan langsung dipasang dan disolder di permukaan atas PCB. Jenis ini lebih ringkas, ringan, dan cocok untuk rangkaian dengan ukuran kecil dan densitas tinggi seperti perangkat elektronik modern.

Penggunaan komponen PTH dan SMD disesuaikan dengan kebutuhan desain, ketersediaan ruang pada PCB, serta metode perakitan yang digunakan.

2.2.3. Arduino Uno



Gambar 2.3 Arduino Uno

(Sumber : docs.arduino.cc)

Arduino Uno adalah papan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang berfungsi sebagai unit pengendali utama dalam sistem mesin CNC. Arduino ini menerima perintah gerakan berbasis G-code dari komputer melalui antarmuka komunikasi *USB (Universal Serial Bus)*, kemudian menerjemahkannya menjadi sinyal digital untuk mengontrol motor stepper.

Dalam proyek ini, Arduino Uno diprogram menggunakan firmware GRBL, yaitu firmware *open-source* yang dirancang khusus untuk mengubah perintah G-code menjadi sinyal kontrol gerak. GRBL mengatur kecepatan, arah, dan jumlah langkah motor stepper melalui dua sinyal utama, yaitu STEP dan DIR, yang kemudian diteruskan ke driver motor seperti A4988.

Seluruh proses komunikasi antara komputer (software G-code sender seperti UGS/Candle) dan perangkat keras (Arduino Uno) dilakukan melalui kabel USB Type-B, yang juga menjadi sumber utama pengiriman perintah dan pengaturan parameter sistem.

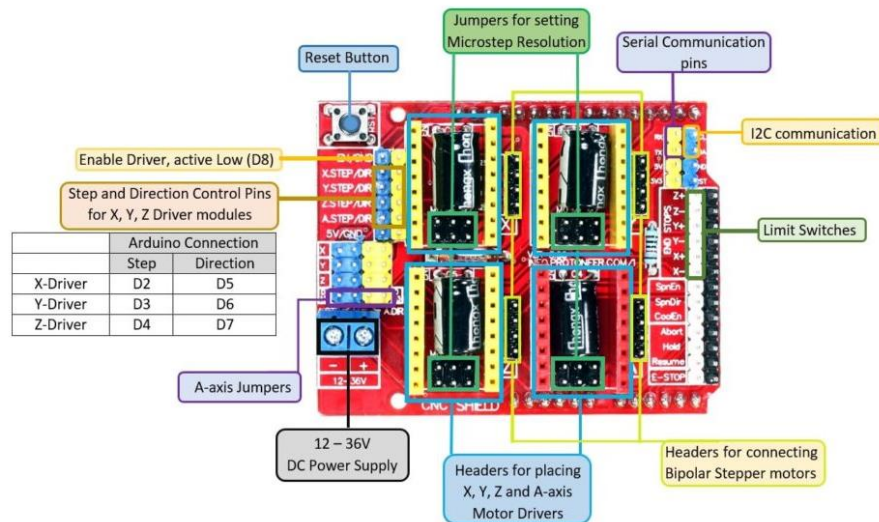
Arduino Uno dilengkapi dengan mikrokontroler ATmega328P yang bekerja pada frekuensi 16 MHz, serta memiliki memori terbatas yaitu 32 KB Flash, 2 KB

SRAM, dan 1 KB EEPROM. Keterbatasan ini menjadi pertimbangan penting dalam pengaturan kecepatan, buffer, serta kemampuan maksimal dalam mengatur gerakan simultan pada beberapa sumbu mesin CNC.

Tabel 2-1 Spesifikasi Arduino Uno

Spesifikasi	Keterangan
Mikrokontroler	ATmega328P
Tegangan Operasi	5 V
Tegangan Input (disarankan)	7–12 V
Pin Digital I/O	14 pin
Pin Digital dengan PWM	6 pin (3, 5, 6, 9, 10, 11)
Pin Input Analog	6 pin (A0–A5)
Arus Maksimum per Pin I/O	40 mA
Arus 3.3V Output	50 mA
Memori Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frekuensi Osilator	16 MHz
Port USB	USB Type-B
Platform Pemrograman	Arduino IDE

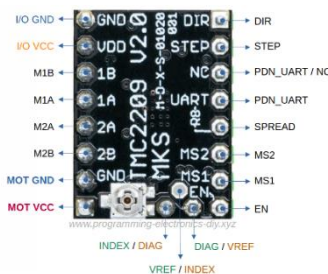
2.2.4. CNC Shield Arduino Uno & Driver TMC2209



Gambar 2.4 CNC Shield V3 Arduino Uno

(Sumber : mytectutor.com)

CNC Shield V3 adalah sebuah expansion board berbasis Arduino Uno yang dirancang khusus untuk proyek seperti mesin CNC, mesin ukir (*engraving*), 3D printer, dan laser cutter. Shield ini berfungsi sebagai jembatan antara Arduino Uno dan driver stepper motor seperti TMC2209, memudahkan koneksi tanpa wiring tambahan yang rumit.



Gambar 2.5 Driver Motor TMC2209

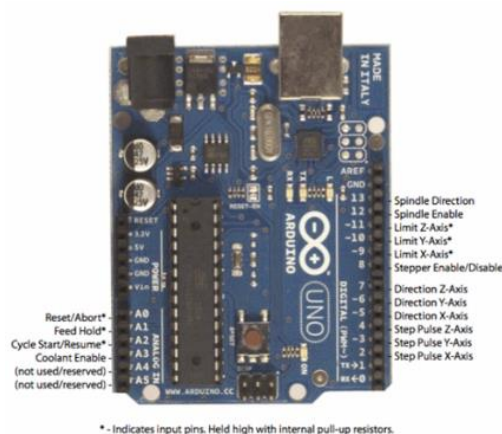
(Sumber : www.programming-electronics-diy.xyz)

Driver TMC2209 adalah modul pengendali motor stepper bipolar berbasis IC Trinamic TMC2209 yang mendukung mikrostepping hingga 1/256. Dibandingkan driver konvensional seperti A4988, TMC2209 memiliki fitur

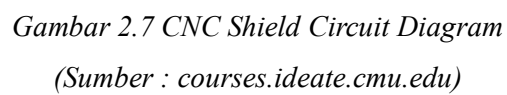
canggih seperti StealthChop, SmoothMotion, dan SpreadCycle, serta mendukung pengaturan parameter secara digital melalui UART.

- Mikrostepping adalah teknik membagi satu langkah penuh motor menjadi beberapa langkah kecil, menghasilkan gerakan yang lebih halus, presisi, dan minim getaran.
- StealthChop adalah mode pengendalian dengan teknik PWM khusus yang membuat pergerakan motor hampir tanpa suara, cocok untuk aplikasi yang memerlukan operasi senyap.
- SmoothMotion merupakan algoritma internal TMC2209 yang menyempurnakan transisi antar mikrostep, sehingga pergerakan motor lebih halus dan minim getaran.
- SpreadCycle adalah mode penggerak berbasis arus konstan untuk menghasilkan torsi tinggi dan respons stabil, ideal digunakan saat beban berat atau kecepatan tinggi.
- UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) adalah antarmuka komunikasi satu arah dari mikrokontroler ke driver. Dengan hanya satu pin data (TX) dan resistor pull-up 220–1000 Ω , pengguna dapat mengatur arus, mikrostepping, mode kerja, dan fitur lainnya secara digital tanpa jumper manual.

Schematic Diagram :



*Gambar 2. 6 Koneksi Pin Arduino Uno
(Sumber : courses.ideate.cmu.edu)*

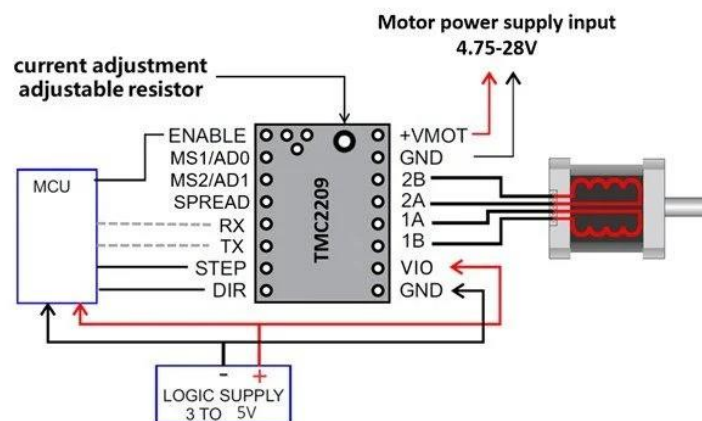


(Sumber : courses.ideate.cmu.edu)

Tabel 2- 2 Koneksi CNC Shield Circuit Diagram

Pin Arduino Uno	Pin CNC Shield V3	Fungsi	Koneksi ke Driver Motor
D2	X.STEP	STEP untuk sumbu X	→ STEP Driver Motor slot X
D5	X.DIR	Arah gerak motor sumbu X	→ DIR Driver Motor slot X
D3	Y.STEP	STEP untuk sumbu Y	→ STEP Driver Motor slot Y
D6	Y.DIR	Arah gerak motor sumbu Y	→ DIR Driver Motor slot Y
D4	Z.STEP	STEP untuk sumbu Z	→ STEP Driver Motor slot Z
D7	Z.DIR	Arah gerak motor sumbu Z	→ DIR Driver Motor slot Z
D12	A.STEP	STEP untuk motor A opsional	→ STEP Driver Motor slot A
D13	A.DIR	Arah gerak motor A	→ DIR Driver Motor slot A
D8	SpnEn	Output ON/OFF spindle (misal relay)	→ Relay modul
D9	SpnDir	Arah spindle (jarang dipakai untuk DC)	Opsional
D10	CoolEn	Output pendingin (coolant ON/OFF)	Opsional (fan/pompa)
A0	X- (Limit switch)	Deteksi batas sumbu X	→ Limit switch
A1	Y-	Deteksi batas sumbu Y	→ Limit switch

Pin Arduino Uno	Pin CNC Shield V3	Fungsi	Koneksi ke Driver Motor
A2	Z-	Deteksi batas sumbu Z	→ Limit switch
A3	Abort	Emergency stop (soft stop GRBL)	→ Tombol E-Stop
A4	Hold	Pause proses CNC	→ Tombol Hold
A5	Resume	Melanjutkan proses setelah Hold	→ Tombol Resume
5V, GND	5V, GND baris biru	Power logic Driver Motor dan limit switch	→ VDD, GND Driver Motor
VIN (PSU Eksternal)	VMOT	Power motor stepper (8V–35V)	→ VMOT Driver Motor



Gambar 2. 8 Koneksi Driver TMC2209

(Sumber : microcontrollerslab.com)

Pada Gambar 2.8 terdapat beberapa koneksi penting pada TMC2209 :

1. Motor Power Supply (VMOT dan GND)

- **VMOT** adalah pin input daya utama untuk motor stepper, dengan rentang tegangan 4,75 – 28V DC. Pin ini tidak dihubungkan ke 5V Arduino, melainkan ke power supply eksternal seperti adaptor 12V atau 24V.

- **GND (Ground motor)** dihubungkan ke ground power supply, dan juga harus dihubungkan ke ground sistem Arduino (*common ground*) untuk menjaga referensi tegangan yang seragam.

Fungsi: Menyediakan daya utama untuk menjalankan motor stepper. Tanpa tegangan ini, motor tidak akan bergerak meskipun logika bekerja.

2. Logic Power Supply (VIO dan GND)

- **VIO** adalah pin logika yang menerima tegangan 3–5,5V dari Arduino (biasanya 5V langsung dari CNC Shield).
- **GND** di sisi ini adalah ground logika, dan juga terhubung ke ground sistem Arduino.

Fungsi: Mengaktifkan sistem logika internal TMC2209 agar dapat membaca sinyal kontrol STEP dan DIR dari Arduino.

3. Input Kontrol dari Arduino (via CNC Shield)

- **STEP** pin: Menerima pulsa dari Arduino yang menentukan jumlah langkah motor stepper. *Satu pulsa = satu langkah motor*.
- **DIR** pin: logika HIGH/LOW untuk menentukan arah rotasi motor (searah jarum jam atau berlawanan).
- Kedua pin ini langsung terhubung dari CNC Shield, yang memetakan pin digital Arduino (misalnya D2–D7).

Fungsi: Mengatur perintah kecepatan dan arah motor berdasarkan instruksi G-code.

4. Pin Konfigurasi Tambahan

- **ENABLE** pin: Digunakan untuk mengaktifkan/menonaktifkan motor. Biasanya dikendalikan oleh CNC Shield.
- **MS1, MS2**: Digunakan untuk pengaturan *microstepping resolution* (1/8, 1/16, 1/32, 1/64). Dipasang jumper di CNC Shield untuk konfigurasi ini.
- **SPREAD dan UART (TX/RX)**: Digunakan untuk komunikasi UART satu arah dengan Arduino, guna mengatur parameter driver secara dinamis (jika fitur UART diaktifkan)

Fungsi: Memungkinkan konfigurasi mode operasi lanjutan dan pengaturan mikrostepping sesuai kebutuhan aplikasi.

Driver TMC2209 berfungsi sebagai penguat sinyal logika dari Arduino menjadi sinyal arus besar untuk menggerakkan motor stepper. Pada sistem CNC berbasis Arduino GRBL, TMC2209 menerima sinyal STEP dan DIR dari Arduino melalui CNC Shield, serta catu daya motor (VMOT) dari power supply 12V.

Logika driver diaktifkan melalui pin VDD 5V dari Arduino. Motor stepper akan bergerak sesuai arah dan jumlah langkah berdasarkan sinyal dari firmware GRBL, yang dikirim melalui perintah G-code. Konektivitas GND antara logika, motor, dan sistem utama sangat penting untuk memastikan kestabilan operasi.

Tabel 2- 3 Spesifikasi Driver TMC2209

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Operasional (VM)	4,75 – 29 V DC
Tegangan Logika (VIO)	3,3 – 5,5 V DC
Arus Maksimum per Fase (RMS)	2,0 A
Arus Puncak Maksimum per Fase	2,8 A (peak)
Frekuensi Clock Internal Maks.	12,5 MHz (menentukan kecepatan pemrosesan dan respon driver terhadap input sinyal)
Jenis Motor yang Didukung	Motor stepper bipolar 2-fase
Antarmuka Kontrol	STEP/DIR dan UART tunggal (single-wire UART)
Resolusi Mikrostepping	Hingga 1/256 langkah
Fitur Khusus	- StealthChop2 (operasi hening) - SpreadCycle (torsi tinggi)

Spesifikasi	Keterangan
	- CoolStep (pengaturan arus adaptif)
Mode Standalone	Mendukung mode mandiri dengan pengatur mikrostepping otomatis tanpa mikrokontroler
Fitur Perlindungan	Perlindungan overtemperature, overcurrent, dan undervoltage
Koneksi UART	Digunakan untuk konfigurasi dinamis parameter driver melalui satu jalur komunikasi

Tabel 2- 4 Mikrostepping Driver TMC2209

MS0	MS1	Resolusi Mikrostep	Step Putaran Motor (1,8°)
LOW	LOW	1/8 atau Eighth Step	1600 Step (> cepat, < detail)
HIGH	HIGH	1/16 atau Sixteenth Step	3200 Step
LOW	HIGH	1/32	6400 Step
HIGH	LOW	1/64	12800 Step
-	-	1/256 (via UART)	51200 langkah (Hanya dapat diaktifkan melalui

MS0	MS1	Resolusi Mikrostep	Step Putaran Motor (1,8°)
			UART, > detail, < cepat)

Perhitungan Jumlah Langkah Motor Stepper:

Motor stepper bipolar standar umumnya memiliki sudut langkah sebesar 1,8° per langkah penuh (*full step*). Artinya, dalam satu putaran penuh (360°), motor tersebut membutuhkan:

$$\text{Jumlah langkah penuh} = \frac{360^0}{1,8^0} = 200 \text{ Langkah}$$

Saat driver stepper seperti **TMC2209** digunakan dalam mode *mikrostepping*, setiap langkah penuh akan dibagi menjadi sejumlah *mikrostep* untuk menghasilkan gerakan yang lebih halus dan presisi.

Jika menggunakan mode **1/16 step (Sixteenth Step)**, maka setiap langkah penuh dibagi menjadi 16 bagian. Maka jumlah langkah dalam satu putaran menjadi:

$$\text{Jumlah langkah mikrostep} = 200 \times 16 = 3200 \text{ Langkah}$$

Dengan demikian, pada mode 1/16 *mikrostepping*, motor membutuhkan 3200 langkah untuk menyelesaikan satu putaran penuh (360°). Ini menghasilkan gerakan yang lebih halus dibandingkan mode *full-step* karena setiap langkahnya lebih kecil, yaitu:

$$\text{Sudut per mikrostep} = \frac{360^0}{3200} = 0,1125^0$$

Jika menggunakan mode *full step* (1/1) pada driver TMC2209, pengaturan mikrostepping harus dilakukan melalui komunikasi UART, karena mode ini tidak tersedia secara manual melalui jumper MS1/MS2 pada CNC Shield seperti pada *Tabel 2-4*.

Perhitungan Tegangan Referensi (Vref):

Untuk menghindari overhear serta memastikan arus yang sesuai bagi motor stepper NEMA 17 model 17HS8401, perlu dilakukan pengaturan tegangan referensi (*Vref*) pada driver TMC2209. Tegangan referensi ini menentukan besar arus RMS (*Root Mean Square*) maksimum yang disalurkan ke tiap fasa motor oleh driver.

Pengukuran V_{ref} dilakukan menggunakan multimeter antara pin trimpot V_{ref} dan GND saat driver dalam keadaan menyala (aktif).

Motor stepper 17HS8401 memiliki spesifikasi arus maksimum sebesar 1,7 A per fasa. Besarnya V_{ref} dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$V_{ref} = I_{RMS} \times 0,71 \times 2$$

Dimana:

- V_{ref} = Tegangan referensi (Volt)
- I_{RMS} = Arus maksimum per fasa motor (Ampere)
- 0,71 = Faktor konversi internal dari arus RMS ke tegangan referensi, sesuai karakteristik IC TMC2209
- 2 = Faktor pengganda dari konfigurasi internal sirkuit sensing TMC2209

Perhitungan:

$$V_{ref} = 1,7 \times 0,71 \times 2 = 2,41 \text{ VDC}$$

Jika diketahui V_{ref} , maka arus dapat dihitung menggunakan:

$$I_{RMS} = \frac{V_{ref}}{0,71 \times 2} = \frac{2,41 \text{ VDC}}{1,42} = 1,69 \text{ A per fasa}$$

2.2.5. Power Supply



Gambar 2.9 Power Supply 12 VDC

(Sumber : www.rs-online.id)

Power supply atau catu daya adalah perangkat elektronik yang berfungsi sebagai sumber energi listrik bagi peralatan elektronik lainnya. Umumnya, power supply bekerja dengan mengubah tegangan dari sumber arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC), yang lebih stabil dan sesuai dengan kebutuhan sebagian besar rangkaian elektronik. Dalam aplikasi seperti CNC Shield Arduino, *power supply* berperan penting untuk memberikan tegangan dan arus yang cukup guna

menggerakkan motor stepper, karena suplai daya dari USB Arduino tidak mampu memenuhi kebutuhan tersebut. Tegangan DC eksternal, seperti 12V, disalurkan ke terminal khusus pada CNC Shield untuk memberi daya pada driver motor (misalnya TMC2209) dan memastikan motor stepper beroperasi dengan torsi dan kecepatan yang optimal.

Tabel 2- 5 Spesifikasi Power Supply 12VDC

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Input	AC 110/240V
Frekuensi Input	50/60Hz
Tegangan Output	DC 12V
Arus Output	Max 20A

2.2.6. Motor Stepper NEMA 17

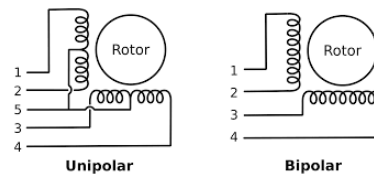
Motor stepper adalah motor listrik yang bergerak secara diskrit dalam bentuk langkah-langkah tetap (*step*) yang dikendalikan oleh pulsa digital. Tidak seperti motor DC konvensional yang menggunakan sikat (*brush*) untuk komutasi, motor stepper beroperasi dengan mengaktifkan kumparan stator secara berurutan untuk menghasilkan gerakan rotasi yang presisi tanpa memerlukan sistem umpan balik (*open-loop control*).

Keunggulan utama motor stepper adalah presisi posisi, respon langsung terhadap sinyal digital, dan kemudahan kontrol, menjadikannya ideal untuk aplikasi seperti mesin CNC, printer 3D, dan sistem otomatisasi presisi lainnya. Berdasarkan struktur rotor dan prinsip kerjanya, motor stepper diklasifikasikan menjadi tiga :

1. *Variable Reluctance (VR)* : Menggunakan rotor besi lunak bergerigi tanpa magnet permanen. Gerakan terjadi karena tarikan elektromagnetik dari stator saat pulsa diterima.
2. *Permanent Magnet (PM)*: Memiliki rotor magnet permanen tanpa gerigi. Mengandalkan tarik-menarik antara kutub rotor dan medan magnet stator.
3. *Hybrid*: Menggabungkan prinsip VR dan PM, menghasilkan kinerja terbaik dari keduanya memiliki resolusi tinggi (hingga 0.9° per langkah), torsi lebih

besar, dan efisiensi tinggi. Umumnya digunakan dalam aplikasi presisi tinggi.

Motor stepper juga diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi lilitan statornya menjadi :



Gambar 2.10 Jenis Lilitan Motor Stepper

(Sumber : www.andalanelektro.id)

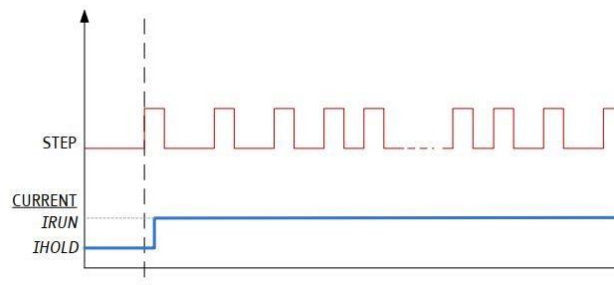
1. Unipolar: Memiliki lilitan dengan cabang tengah (*center tap*), sehingga lebih mudah dikendalikan karena hanya membutuhkan pengalihan arus satu arah. Motor ini dapat dikontrol langsung menggunakan sinyal PWM sederhana dan driver transistor switching, namun memiliki kekurangan pada sisi torsi yang lebih rendah.
2. Bipolar: Tidak memiliki cabang tengah, sehingga arus harus dibalik arah pada setiap kumparan untuk menghasilkan gerakan. Karena itu, motor bipolar memerlukan driver khusus seperti A4988, DRV8825, atau TMC2209 yang menerima sinyal digital berupa pulsa STEP dan arah DIR untuk mengontrol gerakan. Meskipun memerlukan kontroler yang lebih kompleks, motor bipolar mampu menghasilkan torsi lebih besar dan kinerja yang lebih stabil pada kecepatan rendah hingga sedang.



Gambar 2.11 Motor Stepper Nema 17

(Sumber : www.etechnophiles.com)

Pada proyek ini digunakan motor stepper NEMA 17 bipolar, berukuran 42×42 mm. Motor ini umum digunakan untuk penggerak sumbu X, Y, dan Z karena presisi, stabilitas, dan torsi yang cukup.



Gambar 2. 12 Gambar Diagram Pulsa STEP Motor Stepper

(Sumber : www.programming-electronics-diy.xyz)

Kontrol motor dilakukan melalui dua sinyal utama dari mikrokontroler (seperti Arduino Uno dengan firmware GRBL) :

1. STEP: sinyal pulsa logika digital (gelombang persegi). Setiap transisi LOW $\rightarrow$ HIGH menyebabkan motor bergerak 1 langkah. Durasi sinyal HIGH ditentukan oleh parameter \$0, misalnya \$0=10 berarti pulsa selama 10 μ s.
2. DIR (*Direction*): menentukan arah rotasi motor. Logika HIGH menyebabkan motor berputar searah jarum jam (CW), dan LOW berlawanan arah jarum jam (CCW).

Driver menerima sinyal STEP dan DIR, dan mengatur arus ke motor serta mode *microstepping*. *Microstepping* (misalnya $1/16 = 3200$ langkah atau $1/32 = 6400$ langkah) meningkatkan resolusi gerak, meskipun membutuhkan lebih banyak pulsa untuk jarak tempuh yang sama.

Tabel 2- 6 Spesifikasi Motor Stepper Nema 17

Spesifikasi	Keterangan
No Model	17HS8401
Tipe	Hybrid Bipolar
Phasa	2
Arus/Phasa	1,7 A

Spesifikasi	Keterangan
Step Angle	1,8° (200 Step/Putaran)
Max Torsi	0,45 Nm (45 N·cm)
Berat	±350 g

Feedrate adalah parameter G-code yang menentukan kecepatan gerak alat potong relatif terhadap benda kerja, dinyatakan dalam satuan mm/menit. Contoh :

G1 X10 F100

Perintah G-code seperti G1 X10 F500 berarti menggerakkan sumbu X sejauh 10 mm dengan kecepatan 100 mm/menit. Berdasarkan perhitungan waktu, gerakan ini akan berlangsung selama :

$$10 \text{ mm} \div 100 \text{ mm/menit} = 0,1 \text{ menit}$$

$$= 0,1 \times 60 = 6 \text{ detik}$$

Feedrate memengaruhi kecepatan keluaran pulsa STEP dari GRBL. Jika terlalu tinggi, Arduino Uno dengan mikroprosesor ATmega328P (16 MHz, 2KB SRAM) bisa gagal menjaga akurasi sinyal, yang mengakibatkan motor kehilangan langkah (*lost step*).

Dalam penggunaan Arduino Uno dan GRBL, firmware GRBL bekerja dengan prinsip :

- *Motion Planning*: Menyusun lintasan gerakan dengan kecepatan dan akselerasi halus.
- *Step Pulse Generation*: Mengubah perintah gerakan menjadi pulsa digital.
- *Serial Buffer*: 128 byte, menyimpan data G-code yang belum diproses.
- *Planner Buffer*: 16 gerakan yang disiapkan dalam antrean

Contoh perhitungan teknis :

$$S100=80 \text{ steps/mm}, F=1200 \text{ mm/min}$$

Maka GRBL perlu menghasilkan :

$$80 \times 1200 \div 60 = 1600 \text{ steps/sec}$$

Jika menggunakan microstepping 1/16, maka :

$$1600 \times 16 = 25.600 \text{ mikrostep/detik}$$

Batas maksimum stabil Arduino Uno (~30.000–38.400 langkah/detik). Jika melebihi, akan terjadi penurunan presisi atau alarm GRBL.

Pada firmware GRBL yang berjalan di Arduino Uno bertugas memproses perintah G-code dan menghasilkan sinyal ke motor. Parameter penting yang mempengaruhi kinerja motor stepper antara lain :

- $\$0-\6 : Pengaturan pulsa dan arah sinyal.
- $\$100-\102 : Jumlah langkah per mm untuk tiap sumbu (X, Y, Z).
- $\$110-\112 : Kecepatan maksimum per sumbu.
- $\$120-\122 : Akselerasi per sumbu.
- $\$130-\132 : Panjang perjalanan maksimum (max travel) tiap sumbu

2.2.7. MCB (Miniature Circuit Breaker)



Gambar 2.13 MCB (Miniature Circuit Breaker)

(Sumber : e-katalog.lkpp.go.id)

MCB (*Miniature Circuit Breaker*) adalah perangkat pengaman listrik yang berfungsi sebagai pemutus arus otomatis untuk menggantikan sekring konvensional. MCB bekerja dengan memutus aliran listrik secara otomatis apabila terjadi kelebihan beban (*overload*) atau hubungan singkat (*short circuit*), sehingga melindungi peralatan dan instalasi listrik dari kerusakan.

MCB tersedia dalam beberapa tipe karakteristik berdasarkan tingkat sensitivitas terhadap lonjakan arus, di antaranya tipe B, C, dan D :

1. Tipe B

Dirancang untuk memutus sirkuit jika terjadi lonjakan arus sebesar 3 hingga 5 kali dari nilai nominal MCB. Tipe ini cocok untuk instalasi rumah tangga atau komersial ringan yang tidak memiliki lonjakan arus tinggi.

2. Tipe C

Memutus arus ketika terjadi lonjakan sebesar 5 hingga 10 kali dari nilai nominal. Tipe ini banyak digunakan pada lingkungan industri ringan dan komersial, termasuk perangkat dengan beban induktif seperti motor listrik kecil dan lampu dengan ballast.

3. Tipe D

Diperuntukkan bagi peralatan industri berat yang memiliki lonjakan arus tinggi, seperti mesin las, motor besar, dan mesin X-ray. MCB tipe ini hanya akan trip jika terjadi lonjakan arus antara 10 hingga 20 kali dari nilai nominal.

2.2.8. Cooling Fan



Gambar 2.14 Cooling Fan

(Sumber : orbit.co.id)

Cooling Fan merupakan komponen penting dalam sistem mesin CNC yang berfungsi menjaga suhu operasional tetap stabil dengan mendinginkan komponen-komponen yang menghasilkan panas, seperti driver motor dan power supply. *Overheating* atau panas berlebih dapat menyebabkan penurunan kinerja hingga kerusakan pada perangkat elektronik.

Dengan adanya *cooling fan*, sirkulasi udara di sekitar komponen panas menjadi lebih baik sehingga risiko *overheating* dapat diminimalkan. Dalam proyek mesin CNC ini digunakan kipas DC 12V sebagai sistem pendingin, yang dipasang secara strategis di dekat driver motor dan *power supply*. Penempatan *fan* yang tepat sangat penting untuk efisiensi pendinginan dan menjaga stabilitas sistem secara keseluruhan.

2.2.9. Limit Switches



Gambar 2.15 Limit Switch

(Sumber : www.edukasielektronika.com)

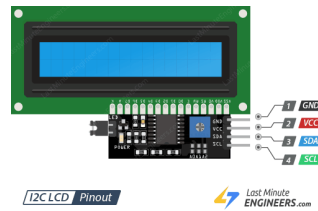
Limit switch merupakan komponen penting dalam proyek mesin CNC yang berfungsi sebagai sensor batas untuk mendeteksi posisi maksimum pergerakan pada sumbu X, Y, dan Z. Fungsinya adalah mencegah motor stepper atau komponen mekanis lainnya bergerak melampaui batas fisik yang telah ditentukan, sehingga dapat mencegah potensi kerusakan pada mesin atau material kerja.

Dalam mesin CNC ini menggunakan *Limit switch* tipe 10T85 bekerja dengan memberikan sinyal ke pengontrol (seperti Arduino Uno) saat aktuator mesin menyentuh atau mencapai titik akhir lintasan. Sinyal ini kemudian digunakan untuk menghentikan pergerakan motor atau melakukan proses homing, yaitu kalibrasi posisi awal mesin CNC, guna menjaga presisi dan keamanan sistem.

Switch ini umumnya memiliki dua mode kerja: *Normally Open* (NO) dan *Normally Closed* (NC). Perubahan status dari NO ke tertutup, atau dari NC ke terbuka, terjadi saat aktuator ditekan atau dilepaskan, yang menjadi penanda bahwa batas mekanis telah tercapai.

Penggunaan *limit switch* secara strategis sangat penting untuk menjaga integritas sistem, mencegah tabrakan, dan meningkatkan efisiensi serta akurasi kerja mesin CNC.

2.2.10. LCD Display & I2C



Gambar 2.16 LCD Display & I2C

(Sumber : lastminuteengineers.com)

LCD Display dengan modul I2C merupakan komponen penting dalam proyek mesin CNC yang berfungsi untuk menampilkan informasi secara real-time, seperti posisi koordinat sumbu, status sistem, atau pesan kesalahan. LCD ini memberikan antarmuka visual yang memudahkan pemantauan kinerja mesin tanpa harus terus-menerus melihat komputer.

Modul I2C (*Inter-Integrated Circuit*) memungkinkan LCD berkomunikasi dengan mikrokontroler hanya melalui dua jalur, yaitu SDA dan SCL. Hal ini menghemat penggunaan pin digital dan menyederhanakan tata letak kabel pada proyek. Dalam mesin CNC ini, LCD I2C tidak terhubung langsung ke Arduino Uno yang menjalankan CNC Shield, melainkan ke mikrokontroler terpisah.

Mikrokontroler tersebut menerima data posisi dari Arduino Uno melalui komunikasi serial, lalu meneruskannya ke LCD I2C untuk ditampilkan. Skema ini digunakan karena hampir seluruh pin Arduino Uno telah digunakan oleh CNC Shield, sehingga tidak memungkinkan untuk menghubungkan langsung LCD I2C ke Arduino Uno.

2.2.11. Arduino Nano



Gambar 2.17 Arduino Nano

(Sumber : bromleysat.com)

Arduino Nano merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega328 yang berukuran kecil dan ringkas, sehingga sangat cocok digunakan dalam proyek-proyek dengan ruang terbatas, termasuk mesin CNC. Dalam proyek mesin CNC ini,

Arduino Nano berperan sebagai mikrokontroler pembantu yang bertugas menampilkan informasi posisi koordinat sumbu X, Y, dan Z pada layar LCD I2C.

LCD I2C memang bisa langsung digunakan dengan Arduino Uno, namun GRBL yang berjalan di Uno sudah penuh menggunakan port serial dan tidak menyediakan antarmuka langsung untuk LCD. Modifikasi firmware GRBL untuk menampilkan posisi sumbu X, Y, Z ke LCD bisa dilakukan, tetapi kompleks dan berisiko menimbulkan error.

Solusi yang lebih sederhana dan aman adalah menggunakan Arduino tambahan, seperti Arduino Nano, yang hanya berfungsi sebagai pembaca tampilan. Arduino Nano akan membaca data status posisi (X, Y, Z) dari GRBL melalui pin TX dari CNC Shield, lalu menampilkannya ke LCD I2C.

Karena Nano hanya membaca data dari GRBL, cukup sambungkan pin TX dari CNC Shield ke pin RX Arduino Nano, tanpa perlu koneksi balik. Tidak diperlukan modifikasi pada firmware GRBL, karena Nano hanya memantau data serial yang dikirim oleh GRBL secara pasif.

2.2.12. Motor DC 775



Gambar 2.18 Motor DC 775

(Sumber : www.amazon.com)

Motor DC 775 merupakan salah satu komponen penting dalam proyek mesin CNC, yang berfungsi sebagai penggerak spindle untuk proses pemotongan, pengeboran, maupun pengukiran. Motor ini dikenal memiliki desain yang kokoh, dilengkapi dengan *ball bearing* serta *internal cooling fan* untuk menjaga kestabilan suhu saat beroperasi dalam durasi yang lama.

Spindle CNC ini menggunakan motor DC dengan spesifikasi tegangan kerja 12 V dan kecepatan nominal 12.000 RPM. Istilah RPM (*Revolutions Per Minute*) mengacu pada jumlah putaran penuh yang dilakukan oleh poros motor dalam waktu

satu menit. Artinya, pada kecepatan 12.000 RPM, poros motor berputar sebanyak 12.000 kali dalam satu menit. Jika dikonversikan ke dalam satuan detik, maka diperoleh kecepatan putar sebesar 200 putaran per detik ($12.000 \div 60$).

Dalam sistem CNC, motor ini biasanya terhubung ke chuck atauudukan mata bor, dan dikendalikan melalui catu daya DC eksternal. Kombinasi antara kecepatan, daya tahan, dan fleksibilitas tegangan menjadikan motor ini kompatibel dengan berbagai desain sistem kendali berbasis mikrokontroler.

Tabel 2- 7 Spesifikasi Motor DC 775

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Operasi	6 – 20VDC (nominal 12VDC)
Kecepatan Tanpa Beban	12.000 Rpm @ 12VDC
Arus Rated	1,2 A @ 12VDC
Torsi Stall	79 Ncm @ 14,4VDC
Daya	100W
Diameter Poros	Ø5 mm (full round)
Berat	343 gram

2.2.13. Relay Modul 5V Single-Channel



Gambar 2. 19 Modul Relay 5V Single-Channel

(Sumber : techfun.sk)

Relay 5V 1 channel merupakan komponen elektronik yang berfungsi sebagai saklar elektromekanis, yang digunakan untuk mengontrol beban bertegangan dan berarus tinggi menggunakan sinyal tegangan rendah dari mikrokontroler seperti Arduino Uno. Relay ini bekerja dengan prinsip elektromagnetik: ketika kumparan (*coil*) menerima tegangan 5V, medan magnet

yang terbentuk akan menarik kontak saklar, sehingga terjadi perpindahan antara terminal *Normally Close (NC)* dan *Common (COM)*.

Dalam proyek mesin CNC PCB, relay ini digunakan untuk menghidupkan atau mematikan motor spindle DC secara otomatis, berdasarkan logika kendali dari Arduino. Dengan memisahkan sirkuit kontrol (5V) dan sirkuit beban (misalnya 12V atau 24V), relay memberikan isolasi dan perlindungan terhadap lonjakan tegangan yang bisa merusak rangkaian mikrokontroler.

Penggunaan relay memberikan fleksibilitas dalam mengontrol perangkat seperti kipas pendingin, pompa vakum, atau motor, dan sangat penting untuk menjamin keamanan serta keandalan sistem secara keseluruhan.

Tabel 2- 8 Spesifikasi Modul Relay 5V Single-Channel

Spesifikasi	Keterangan
Maximum load	AC 250V/10A, DC 30V/10A
Trigger Current	5mA
Working Voltage	5V
Tipe Kontak	Normally Open (NO), Normally Closed (NC), Common (COM)

2.2.14. Emergency & NO Push Button



Gambar 2. 20 Emergency Push Button

(Sumber : ergatama.id)

Emergency Push Button (E-Stop) adalah tombol darurat yang digunakan untuk menghentikan semua operasi mesin CNC secara instan dan total, terutama ketika terjadi kondisi berbahaya atau kesalahan sistem yang dapat merusak mesin maupun membahayakan operator.

Pada proyek mesin CNC PCB berbasis Arduino UNO + CNC Shield, tombol E-Stop dihubungkan langsung ke pin “*Abort*” pada CNC Shield. Tombol ini biasanya berjenis *Normally Closed (NC)*, artinya dalam kondisi normal (tidak ditekan) sirkuitnya tertutup. Ketika tombol ditekan, sirkuit akan terbuka, yang menyebabkan GRBL mendeteksi sinyal pemutusan sebagai perintah darurat (*abort*). Efek dari E-Stop aktif :

- Semua pergerakan motor stepper langsung berhenti.
- Spindle motor mati.
- Eksekusi G-code dibatalkan.
- GRBL masuk ke mode alarm.
- Di LCD akan muncul status alarm dan sistem harus dilakukan reset sebelum dapat digunakan kembali.

Koneksi tombol E-Stop dilakukan dengan menyambungkan satu sisi tombol ke *pin Abort*, dan sisi lainnya ke *Ground (GND)*.



Gambar 2. 21 Push Button NO (Normally Open)

(Sumber : ubuy.co.id)

. Selain tombol *E-Stop*, proyek ini juga menggunakan dua *Push Button* berjenis *Normally Open (NO)* yang dihubungkan ke *pin HOLD* dan *RESUME* pada CNC Shield.

Push Button NO (Normally Open) berarti sirkuitnya dalam kondisi terbuka saat tidak ditekan, dan hanya menutup (mengalirkan arus) saat ditekan sebentar (*momentary*).

Alasan memilih jenis NO adalah karena fungsi dari *pin Hold* dan *Resume* di GRBL hanya membutuhkan sinyal sesaat (*pulse pendek*) untuk menjalankan aksinya. Sehingga cukup ditekan sekali, lalu dilepas, maka perintah akan diterima tanpa harus menahan tombol terus menerus. Fungsi tombol :

1. HOLD (Feed Hold)

- Saat tombol Hold ditekan, GRBL akan menghentikan pergerakan mesin secara bertahap dan aman.
- Mesin akan “pause” dan menunggu perintah selanjutnya.
- Ini berguna saat ingin mengecek jalur gerakan atau menghentikan sementara tanpa kehilangan posisi.

2. RESUME

- Setelah mesin “pause”, tombol Resume ditekan untuk melanjutkan proses CNC dari titik terakhir.
- Ini memungkinkan proses berjalan kembali tanpa perlu mengulang program.

Koneksi :

- Tombol Hold → dihubungkan ke pin Hold di CNC Shield dan ke GND.
- Tombol Resume → dihubungkan ke pin Resume dan ke GND.
- GRBL akan mendeteksi logika LOW sesaat dari tombol NO sebagai sinyal aktif.

2.2.15. Pilot Lamp



Gambar 2. 22 Pilot Lamp

(Sumber : www.telesindo.id)

Pilot lamp adalah indikator visual berupa lampu yang digunakan untuk menunjukkan adanya aliran listrik pada panel. Lampu ini akan menyala ketika panel menerima tegangan, dan dapat digunakan pada sistem bertegangan 12V AC maupun DC.

2.2.16. Watt Meter DC Digital



Gambar 2. 23 Watt Meter DC

(Sumber : orbit.co.id)

Watt meter DC adalah alat ukur yang digunakan untuk memantau tegangan, arus, daya, dan energi listrik pada sistem arus searah (DC). Dalam proyek mesin CNC PCB, alat ini berfungsi untuk mengetahui konsumsi daya total dari komponen seperti motor stepper, spindle, dan Arduino.

Watt meter yang digunakan memiliki rentang tegangan 4,8–60V dan mampu mengukur arus hingga 150A, sehingga cocok untuk sistem berbasis 12V DC. Penggunaan watt meter membantu mencegah kerusakan akibat beban berlebih dan memudahkan pemantauan sistem secara real-time.

2.2.17. Kabel Jumper / Pita



Gambar 2. 24 Kabel Pita

(Sumber : id.made-in-china.com)

Dalam proyek mesin CNC, kabel pita digunakan untuk menyusun jalur koneksi paralel antar komponen kontrol seperti koneksi dari Arduino Uno ke limit switch, modul relay dan komponen lainnya.

2.2.18. Aluminium Profile V-Slot 2020



Gambar 2. 25 Aluminium Profile V-Slot 2020

(Sumber : vslot-poland.com)

Aluminium profil *V-slot* 2020 adalah material rangka berbentuk batang ekstrusi aluminium dengan penampang 20×20 mm yang memiliki alur berbentuk V pada setiap sisi. Dalam proyek mesin CNC PCB ini, aluminium profil *V-slot* 2020 digunakan sebagai rangka utama berukuran 300×270 mm karena sifatnya yang ringan, kuat, tahan korosi, dan mudah dirakit.

Desain modularnya memungkinkan pemasangan komponen seperti roda *V-wheel* dengan presisi, memberikan pergerakan linear yang halus tanpa memerlukan pengeboran tambahan. Oleh karena itu, profil ini sangat cocok untuk konstruksi mesin CNC yang memerlukan kestabilan dan presisi tinggi.

2.2.19. Filamen 3D Printer



Gambar 2. 26 Hasil Cetak Filamen 3D Print
(Sumber : digiwarestore.com)

Dalam proyek mesin CNC PCB ini, digunakan filamen 3D printer untuk mencetak komponen seperti bracket motor stepper pada sumbu X, Y, dan Z. Filamen dipilih karena sifatnya yang mudah dicetak sesuai desain, ringan, serta memiliki kekuatan mekanik yang cukup untuk menopang dan menahan posisi komponen mesin secara stabil.

Desain komponen 3D tersebut dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks, yaitu software desain berbasis CAD (*Computer-Aided Design*) yang memungkinkan membuat model dalam bentuk 2D maupun 3D. SolidWorks mendukung proses desain tiap bagian (*part*) hingga perakitan keseluruhan (*assembly*), sehingga memudahkan dalam pembuatan komponen yang presisi dan siap untuk dicetak menggunakan printer 3D.

2.2.20. Roda V Wheel 625ZZ



Gambar 2. 27 Roda V Wheel 625ZZ

(Sumber : www.lazada.co.id)

Roda *V Wheel* 625ZZ merupakan komponen mekanik berbentuk roda dengan bantalan (*bearing*) tipe 625ZZ yang dirancang untuk bergerak secara presisi di sepanjang jalur aluminium profil *V-slot* 2020. Dalam proyek mesin CNC PCB ini, *V Wheel* digunakan sebagai sistem penggerak pada sumbu X dan Y, memungkinkan pergerakan *body* mesin secara stabil, halus, dan akurat.

Kombinasi antara *V-Wheel* dan *V-slot* menghasilkan sistem gerak linear tanpa gesekan berlebih, mendukung kinerja presisi dalam proses pencetakan jalur PCB.

2.2.21. Idler Pulley 2GT 20T 5mm dan Timing Belt GT2 6mm

Dalam sistem penggerak pada mesin CNC, *Idler Pulley* 2GT 20T 5mm dan *Timing Belt* GT2 6mm bekerja sama untuk menggerakkan sumbu X dan Y dengan presisi.

- *Idler Pulley* 2GT 20T 5mm adalah roda kecil dengan 20 gigi (20T) yang digunakan untuk menahan atau menegangkan timing belt agar tetap kencang dan bergerak dengan lancar. Diameter pully-nya 5mm, yang memungkinkan pemasangan tepat pada sistem penggerak.



Gambar 2. 28 Idler Pulley 2GT 20T 5mm

(Sumber : us.ratrig.com)

- *Timing Belt* GT2 6mm adalah tali dengan gigi yang terpasang pada kedua sisi, berukuran 6mm lebar. Gigi-gigi pada belt ini cocok dengan gigi pada pulley, sehingga saat motor stepper berputar, belt ini akan bergerak dengan presisi, menggerakkan sumbu mesin dengan kecepatan yang diinginkan.



Gambar 2. 29 Timing Belt GT2 6mm

(Sumber : www.tinytronics.nl)

Pada mekanisme timing belt GT2 dengan pitch 2 mm dan pulley 20T, satu putaran penuh pulley menghasilkan perpindahan linear sejauh 40 mm ($20 \text{ gigi} \times 2 \text{ mm}$).

Sistem *timing belt* dan *idler pulley* pada mesin CNC terhubung langsung ke motor stepper dan berfungsi mengubah gerakan rotasi motor menjadi gerakan linier pada sumbu X dan Y. Akurasi pergerakan sangat dipengaruhi oleh jumlah gigi pulley dan pitch belt, yang menjadi dasar perhitungan parameter kalibrasi GRBL yaitu $\$100$ dan $\$101$ (jumlah langkah per milimeter).

Kalibrasi ini penting untuk memastikan dimensi jalur PCB sesuai dengan desain. Dengan sistem *belt-pulley*, mesin mampu bergerak secara halus, efisien, dan minim gesekan, sehingga mendukung presisi tinggi dalam proses pencetakan jalur PCB.

2.2.22. Besi Assental



Gambar 2. 30 Besi Assental

(Sumber : solusibaja.co.id)

Besi Assental dengan diameter 5mm berbentuk seperti batang silindris atau bulat dalam proyek mesin CNC PCB digunakan sebagai komponen penyambung dan penguat struktur, sekaligus berfungsi sebagai poros pada body sumbu X dan Z.

Material ini dipilih karena memiliki kekuatan dan kekakuan tinggi, sehingga mampu menjaga kestabilan gerakan serta menahan beban selama proses kerja

mesin. Dengan peran ganda sebagai penopang dan poros, besi assental membantu menjaga presisi dan kekuatan mekanik pada pergerakan sumbu mesin.

2.2.23. Lead Screw dan T Nut T8 Lead 8 Pitch 2mm 4Start



Gambar 2. 31 Lead Screw dan T Nut T8 Lead 8 Pitch 2mm 4Start

(Sumber : shopee.co.id)

Pada mekanisme lead screw T8 dengan pitch 2 mm dan konfigurasi 4 start (lead = 8 mm per putaran). Kombinasi antara *lead screw*, *T-nut*, dan *motor stepper* ini menghasilkan gerakan naik-turun yang stabil, presisi, dan minim getaran. Karena gerakan sumbu Z bersifat vertikal dan membutuhkan tingkat akurasi tinggi saat proses pengangkatan atau penurunan spindle, maka sistem ini sangat sesuai.

Selain itu, karakteristik mekanis dari *lead screw* tersebut dijadikan acuan dalam menentukan nilai parameter kalibrasi GRBL \$102, yaitu jumlah langkah per milimeter pada sumbu Z, agar pergerakan aktual sesuai dengan jarak yang ditentukan dalam G-code.

Dengan sistem ini, pergerakan sumbu Z dapat diatur secara tepat oleh firmware GRBL melalui pengendalian sinyal ke driver motor stepper, mendukung keakuratan hasil pencetakan jalur pada permukaan PCB.

2.2.24. Pulley Coupling



Gambar 2. 32 Pulley Coupling

(Sumber : www.amazon.com.au)

Pulley Coupling pada dengan ukuran lubang 5mm dan 8mm pada mesin CNC PCB berfungsi untuk menghubungkan motor stepper dengan *lead screw* atau besi assental, seperti pada sumbu Z dan Y. Komponen ini mentransfer gerakan rotasi dari motor ke *lead screw*, yang kemudian mengubah putaran motor menjadi gerakan linear.

Dengan demikian, pulley coupling memastikan pergerakan presisi dan stabil pada sumbu Z serta Y, memungkinkan mesin untuk bergerak sesuai dengan instruksi yang diberikan dalam proses pembuatan jalur PCB.

2.2.25. Mini Drill Chuck

Mini Drill Chuck dan Mata Bor pada mesin CNC PCB terhubung dengan motor spindel untuk melakukan proses pengeboran pada papan PCB.



Gambar 2. 33 Mini Drill Chuck

(Sumber : www.blibli.com)

Drill chuck berfungsi untuk memegang mata bor dengan kuat dan stabil saat berputar. *Drill chuck* memiliki diameter penjepit 0,3 – 3,5mm dengan diameter shaft 5mm untuk terhubung ke motor DC Spindel.

2.2.26. Mata Bor

Mata bor berfungsi untuk membuat lubang yang rapi dan presisi pada berbagai material seperti kayu, plastik, logam, dan papan PCB. Pemilihan jenis mata bor disesuaikan dengan kebutuhan proses pengeboran dan karakteristik bahan. Berikut beberapa jenis mata bor yang umum digunakan :

1. Twist Bit

Mata bor serbaguna yang dapat digunakan pada material kayu, plastik, logam, hingga PCB elektronik. Dapat beroperasi secara vertikal maupun horizontal.

2. Auger Bit

Memiliki desain spiral lebar dan panjang, cocok untuk melubangi kayu sekaligus mengeluarkan sisa serutan dari dalam lubang.

3. Hole Saw Bit

Digunakan untuk membuat lubang berdiameter besar pada kayu. Mata bor ini memotong bagian luar lingkaran dan menyisakan bagian tengah di dalam casingnya.

4. End Mill

Berbentuk seperti mata bor dengan kemampuan memotong dari sisi samping dan ujung. Umumnya digunakan untuk memperluas lubang secara horizontal maupun vertikal dengan tingkat presisi tinggi, terutama pada pekerjaan milling.

5. V-Bit

Mata potong berbentuk huruf "V" yang biasa digunakan untuk membuat jalur ukiran halus atau alur sempit pada permukaan material, seperti pada proses engraving PCB.

6. Spur Bits

Dilengkapi ujung tajam di tengah dan bilah pemotong di sekelilingnya, Spur Bit dirancang untuk menjaga posisi pengeboran tetap lurus agar menghasilkan lubang yang presisi.



Gambar 2. 34 V-Bit dan End Mill

(Sumber : sienci.com dan www.shop-apt.co.uk)

Dalam proses pembuatan jalur dan pengeboran pada papan sirkuit cetak (PCB), pemilihan jenis mata bor atau pahat (*tool*) menjadi faktor penting yang sangat memengaruhi presisi, kebersihan hasil pemotongan, dan keawetan alat. Untuk membuat jalur pada permukaan tembaga PCB, digunakan jenis mata bor *V-bit* dengan sudut 30° , diameter shaft 3,17 mm, serta diameter ujung sekitar 0,1 mm.

V-bit dengan sudut 30° dipilih karena memberikan keseimbangan optimal antara ketajaman, daya tahan, dan kemampuan menghasilkan goresan halus pada permukaan tembaga. Mata bor bersudut lebih kecil seperti 15° memang mampu menghasilkan ukiran lebih sempit dan detail, tetapi lebih rentan patah, terutama saat digunakan pada kecepatan tinggi. Sebaliknya, sudut yang lebih besar seperti 60° atau 90° akan menghasilkan jalur yang lebih lebar dan kurang cocok untuk detail kecil pada desain PCB.

Lebar jalur atau ukiran yang dihasilkan oleh *V-bit* sangat bergantung pada sudut mata bor dan kedalaman pemotongan (*Z*). Secara geometris, semakin dalam posisi *Z* saat proses engraving, maka semakin lebar jalur yang diukir oleh *V-bit*. Hubungan ini menjadi dasar dalam menentukan parameter kedalaman potong di software seperti FlatCAM agar sesuai dengan lebar jalur yang diinginkan.

Proses pengikisan tembaga menggunakan *V-bit* didukung oleh motor spindle DC 775 12V dengan kecepatan putar sekitar 12.000 rpm, yang cukup tinggi untuk memastikan hasil potong bersih dan minim getaran. Kecepatan tersebut juga membantu menghindari efek *burning* (terbakar) pada tembaga serta menjaga ujung *V-bit* tetap stabil selama proses kerja.

Untuk pembuatan lubang (*drill*) pada PCB, digunakan mata bor jenis *end mill* berdiameter kecil, seperti 0,8 mm. Berbeda dengan *V-bit*, *end mill* memiliki ujung datar dan desain pemotong lurus, sehingga mampu mengebor lubang silinder secara vertikal dengan hasil yang rapi dan presisi. Penggunaan *V-bit* untuk pengeboran tidak disarankan karena bentuk ujungnya yang meruncing hanya cocok untuk pemotongan permukaan, bukan pengeboran tegak lurus.

2.2.27. Box Panel



Gambar 2. 35 Box Panel

(Sumber : saka-lighting.com)

Box Panel pada mesin CNC PCB ini berukuran 40x30x18 cm dan dirancang untuk ditempatkan di dalam ruangan (*indoor*). *Box Panel* berfungsi sebagai wadah untuk menyimpan komponen elektronik seperti Arduino, driver motor stepper, power supply, serta kabel-kabel yang terhubung dengan sistem mesin CNC. Dengan desain yang terorganisir, *Box Panel* membantu menjaga komponen tetap aman, rapi, dan mudah diakses selama operasional mesin.

2.2.28. Mur & Baut

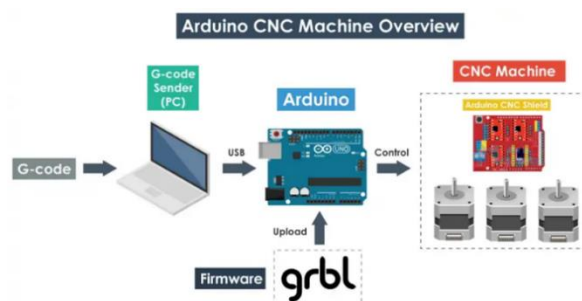


Gambar 2. 36 Mur dan Baut

(Sumber : www.fastindojayaabadi.com)

Mur dan Baut digunakan untuk menyatukan semua bagian body atau rangka mesin CNC PCB. Komponen ini berfungsi untuk mengikat dan mengamankan berbagai elemen struktur mesin, seperti profil aluminium, motor, dan komponen lainnya, agar tetap kokoh dan stabil selama operasi. Penggunaan mur dan baut yang tepat memastikan bahwa seluruh rangka mesin CNC terpasang dengan kuat, mendukung kinerja mesin yang presisi dan mencegah pergerakan yang tidak diinginkan pada bagian-bagian mesin.

2.2.29. GRBL Firmware



Gambar 2. 37 Skema Alur GRBL

(Sumber : howtomechatronics-com)

Firmware adalah perangkat lunak sistem yang tertanam di perangkat keras (*hardware*) untuk mengatur operasi dasar. Pada mesin CNC berbasis Arduino, *firmware* berperan sebagai penghubung antara perintah G-code dari komputer dengan pergerakan fisik mesin CNC seperti motor stepper, spindle, serta sistem pengaman.



Gambar 2. 38 Tampilan Program GRBL pada Arduino IDE

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

GRBL merupakan *firmware open-source* berbasis bahasa C yang diunggah ke dalam mikrokontroler ATmega328p milik Arduino Uno. GRBL dirancang secara khusus untuk mengontrol mesin CNC 3-sumbu (X, Y, Z), dengan kemampuan membaca perintah G-code dan mengubahnya menjadi sinyal-sinyal digital untuk mengendalikan :

- Motor stepper (melalui sinyal STEP dan DIR)
- Spindle (ON/OFF, PWM)
- Limit switch
- Tombol kontrol (E-stop, Hold, Resume)

GRBL dapat diunggah ke Arduino melalui Arduino IDE, dan digunakan bersama software G-code sender seperti UGS (*Universal G-code Sender*).

Cara Kerja GRBL di dalam Arduino :

1. Penerimaan G-code dan Serial Buffer

GRBL menerima perintah G-code dari komputer melalui koneksi USB serial. Data yang masuk akan disimpan sementara dalam serial buffer berkapasitas 128 byte, yaitu memori penampung untuk antrian data. Buffer ini menggunakan sistem *FIFO (First In, First Out)*, artinya perintah yang masuk lebih dulu akan diproses lebih dulu. Jika pengiriman G-code terlalu cepat, buffer dapat penuh dan eksekusi akan tertunda hingga tersedia ruang kosong.

2. Motion Planning (Perencanaan Gerak)

Setelah diterima, setiap perintah gerakan dianalisis untuk menghitung lintasan optimal berdasarkan posisi, kecepatan, dan akselerasi. Hasil perencanaan ini disimpan dalam planner buffer, yang mampu menampung maksimal 16 blok gerakan (*motion blocks*) sebelum dikirim sebagai sinyal gerak ke motor. Fungsi planner ini memastikan mesin bergerak halus, efisien, dan terkoordinasi antar-sumbu.

3. Step Pulse Generation (Pulsa Langkah Motor)

GRBL mengubah hasil perencanaan gerak menjadi pulsa sinyal STEP dan sinyal arah DIR, yang dikirim ke masing-masing driver motor stepper. Setiap pulsa STEP mewakili satu langkah motor. Arah pergerakan ditentukan oleh sinyal DIR. Jumlah pulsa disesuaikan dengan parameter kalibrasi langkah per milimeter pada sumbu X, Y, dan Z (*\$100, \$101, \$102*).

4. Pengaturan Feedrate dan Kontrol Motor

Perintah G-code seperti *G1 X10 Y10 F500* akan diuraikan untuk mengatur kecepatan gerak sumbu dengan nilai feedrate sebesar 500 mm/menit. GRBL menyesuaikan frekuensi pulsa STEP agar kecepatan gerakan sesuai dengan yang diperintahkan.

5. Penggunaan Interrupt Timer Internal

Untuk menjamin akurasi dan konsistensi sinyal STEP, GRBL memanfaatkan interrupt timer internal pada chip ATmega328P. Timer ini menghasilkan sinyal secara presisi dan independen, tanpa terganggu oleh

proses lain, sehingga pergerakan motor tetap stabil bahkan saat firmware sedang memproses data lain.

6. Umpan Balik dan Status Mesin

GRBL mengirimkan informasi status ke komputer secara real-time, termasuk:

- Posisi koordinat sumbu X, Y, Z
- Status mesin seperti Idle, Run, Hold, atau Alarm
- Respon terhadap perintah langsung seperti tombol Hold, Resume, dan Emergency Stop (E-Stop)

GRBL terdiri dari berbagai *file .c* dan *.h* yang masing-masing bertanggung jawab untuk fungsi spesifik dalam firmware. Berikut struktur utama folder grbl dan fungsi tiap file :

Tabel 2- 9 Struktur File GRBL

Nama File	Fungsi Utama
config.h	File pengaturan utama GRBL seperti homing, spindle, PWM, dan fitur safety
cpu_map.h	Pemetaan pin Arduino Uno untuk fungsi-fungsi CNC
defaults.h	Menyimpan nilai default setting GRBL (jika EEPROM di-reset)
motion_control.*	Mengelola logika dan algoritma gerakan CNC
planner.*	Merencanakan dan menyusun pergerakan motor sebelum dikirim ke stepper
stepper.*	Menangani sinyal step dan arah untuk menggerakkan motor stepper
spindle_control.*	Mengatur logika output spindle (ON/OFF, PWM, M3/M5)
limits.*	Menangani fungsi limit switch dan homing

Nama File	Fungsi Utama
protocol.*	Menangani parsing G-code, antrian perintah, dan komunikasi serial
serial.*	Mengelola komunikasi antara GRBL dan komputer via USB/serial
system.*	Fungsi inti sistem: status, alarm, error code
eeeprom.*	Membaca dan menulis data ke EEPROM (setting \$ GRBL)
gcode.*	Parser untuk perintah G-code (G0, G1, G28, M3, M5, dll)
probe.*	Fungsi probing otomatis untuk permukaan kerja
report.*	Mengelola pesan status yang dikirim ke user (status mesin, feedback, dll)
nuts_bolts.*	Kumpulan fungsi bantu kecil untuk perhitungan matematika
coolant_control.*	Menangani pendingin otomatis (coolant flood/mist)
main.c	Titik masuk program utama GRBL (setup awal saat booting)
grbl.h	File utama yang menggabungkan seluruh fungsi GRBL ke dalam program

Semua file dengan ekstensi `.c` berisi kode program inti, sedangkan `.h` adalah header yang mendeklarasikan fungsi dan variabel agar bisa digunakan antar-file.

File `config.h` bukan satu-satunya "*otak*", tetapi merupakan inti pengatur perilaku dasar GRBL saat dikompilasi. File ini berisi pengaturan waktu kompilasi (*compile-time configuration*) yang:

- Menentukan fungsi internal utama GRBL
- Mengaktifkan/menonaktifkan fitur seperti homing, limit switch, safety door, variable spindle
- Mengontrol komunikasi, arah gerakan, dan logika pin

Untuk mengubah perilaku dasar GRBL, file `config.h` harus diedit lalu dikompilasi ulang di Arduino IDE sebelum di-upload ke board Arduino.

Tabel 2- 10 Penjelasan Isi File config.h GRBL

Bagian	Fungsi Utama	Keterangan
#define CPU_MAP_ATMEGA328P	Memilih jenis mikrokontroler Arduino	Untuk Arduino Uno (chip ATmega328P)
#define BAUD_RATE 115200	Mengatur kecepatan komunikasi serial	Disarankan tidak diubah, standar GRBL
CMD_*	Mengatur karakter khusus perintah real-time (e.g., ~, !, ?)	Untuk reset, pause, resume, status report, dll
#define HOMING_*	Mengaktifkan fitur homing, arah gerak awal, urutan sumbu	Penting untuk proses "cari titik nol mesin"
#define N_DECIMAL_*	Mengatur jumlah angka desimal dalam output serial GRBL	Untuk pembulatan nilai posisi, kecepatan, RPM
#define VARIABLE_SPINDLE	Mengaktifkan output spindle dengan PWM untuk kontrol kecepatan	Jika dinonaktifkan, spindle hanya ON/OFF
#define INVERT_*	Mengubah logika sinyal pin (misal jika memakai limit switch NC)	Berguna saat menggunakan sensor Normally Closed (NC)
#define ENABLE_M7	Mengaktifkan output tambahan untuk mist coolant (M7)	Default-nya off, bisa diganti ke pin A4
#define SAFETY_DOOR_*	Mengatur fungsi tombol pintu	Berguna jika ada enclosure mesin

Bagian	Fungsi Utama	Keterangan
	keamanan (safety door)	
#define ADAPTIVE_MULTI_AXIS_STEP_SMOOTHING	Mengaktifkan penyaringan langkah motor agar gerakan lebih halus	Aktif secara default
#define ACCELERATION_TICKS_PER_SECOND	Mengatur resolusi waktu percepatan mesin	Nilai default = 100; makin tinggi = gerak makin halus
#define ENABLE_DUAL_AXIS	Mengaktifkan motor gandeng (kloning motor) untuk gantry mesin CNC	Butuh tambahan pin dan switch limit
#define DUAL_AXIS_CONFIG_*	Menentukan jenis CNC shield (misal Protoneer V3.51)	Berpengaruh pada mapping pin D13, A3, A4
#define REPORT_*	Mengontrol data apa saja yang ditampilkan saat status GRBL ditanya (?)	Semua aktif secara default
#define PARKING_*	Mengatur posisi parkir spindle saat safety door terbuka	Berguna untuk keamanan

Contoh Penggunaan :

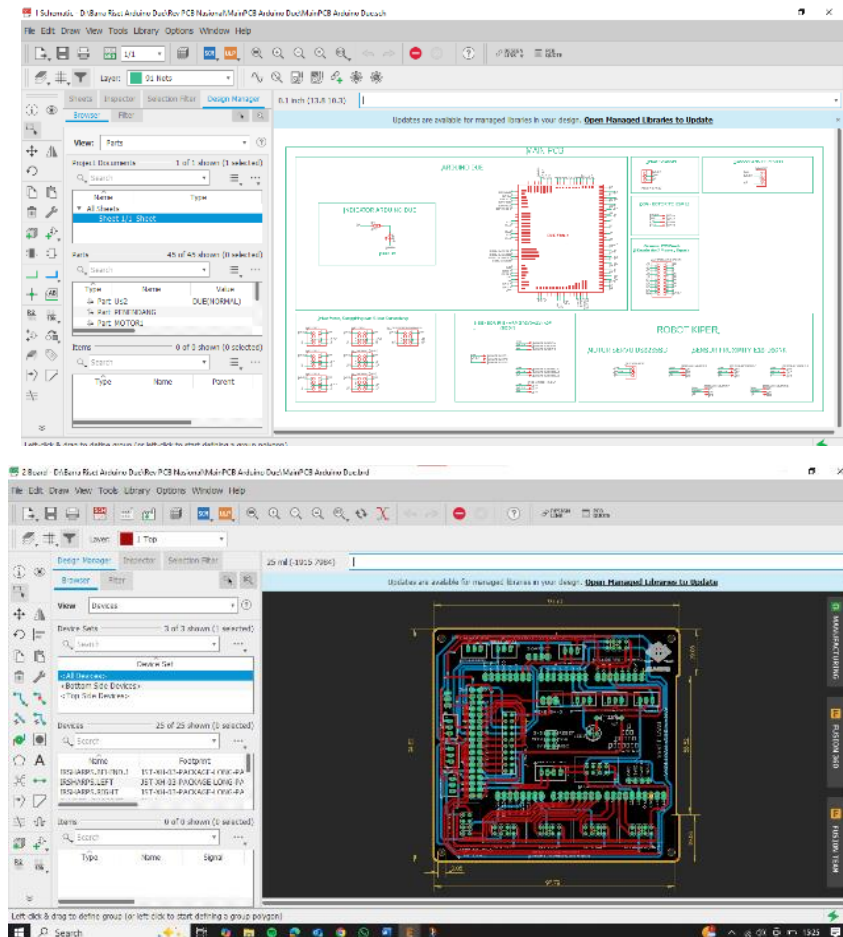
- Jika ingin limit switch NC, aktifkan :
#define INVERT_LIMIT_PIN_MASK ...
- Jika ingin spindle bisa dikontrol kecepatan, aktifkan :
#define VARIABLE_SPINDLE

- Lalu jika ingin menonaktifkan Variabel Spindel :

```
// #define VARIABLE_SPINDLE
```

(Tambahkan // di depan baris #define)

2.2.30. Software Eagle



Gambar 2. 39 Tampilan Layout Rangkaian Schematic & Board Software Eagle
(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Autodesk Eagle (*Easily Applicable Graphical Layout Editor*) adalah perangkat lunak berbasis CAD (*Computer Aided Design*) yang banyak digunakan untuk merancang sirkuit elektronik dan layout jalur PCB (*Printed Circuit Board*). Software ini terdiri dari dua lingkungan utama: Schematic Editor untuk menggambar diagram rangkaian, dan Board Editor untuk menyusun layout jalur PCB.

Pada proyek ini, Eagle digunakan untuk membuat rancangan awal dari rangkaian elektronik berupa skema (schematic), dan dilanjutkan ke proses pembuatan layout PCB. Hasil desain kemudian diekspor dalam bentuk file Gerber (untuk jalur tembaga) dan Excellon (untuk lubang bor), yang dapat diproses lebih lanjut oleh perangkat lunak CAM seperti FlatCAM untuk kemudian diproses oleh mesin CNC.

Alur Umum Penggunaan Eagle :

1. Membuat Schematic (Diagram Rangkaian)
Menggambar rangkaian elektronik menggunakan simbol komponen standar.
2. Generate Netlist
Menentukan hubungan antar pin komponen yang akan diteruskan ke layout.
3. Menentukan Layout Board
Menyusun posisi fisik komponen dan jalur koneksi antar komponen.
4. Routing Jalur PCB
Menghubungkan pin-pin sesuai schematic menggunakan jalur tembaga (trace).
5. Generate Gerber dan Excellon File
Mengekspor file untuk proses produksi PCB

Tabel 2- 11 Fungsi Toolbar pada Eagle

Nama Tool	Fungsi
Info	Menampilkan informasi komponen (value, name, posisi di library, dll).
Group	Mengelompokkan komponen agar dapat dipindah, dicopy, dirotasi, dll.
Move	Memindahkan komponen ke posisi lain di area gambar.
Copy	Menyalin satu atau beberapa komponen.
Delete	Menghapus komponen yang dipilih.
Net	Menghubungkan kaki antar komponen.
Junction	Menyambungkan jalur/net yang bersilangan.
Name	Mengubah atau menghapus nama dari komponen.

Nama Tool	Fungsi
Reposition Attributes	Mengembalikan nama/nilai komponen ke posisi default.
Split	Mengatur atau memindahkan posisi wire.
Slice	Memotong wire (jalur) yang telah digambar.
Show	Menampilkan jalur yang saling terhubung sebagai pengecek koneksi.
Mirror	Membalikkan komponen dari posisi awalnya.
Add Part	Menambahkan komponen dari library ke rangkaian.
Port	Menambahkan port saat membuat skematik.
Bus	Membuat garis bus (koneksi banyak jalur) pada skematik.
Label	Memberi label nama untuk mempermudah koneksi jalur.
Value	Memberikan nilai pada komponen (misalnya nilai resistor).
Replace	Mengganti komponen yang telah ada dengan yang baru.
Mitter	Mengubah tampilan wire menjadi melengkung atau lurus.
Line	Menggambar garis untuk koneksi antar pin.
Arc	Membuat jalur lengkung.
ERC (Electrical Rule Check)	Mengecek apakah ada wire yang terputus atau error.
Text	Menambahkan tulisan pada layout atau schematic.
Polygon	Membuat bidang dengan bentuk acak (misalnya ground fill).
Dimension	Menampilkan ukuran antar objek (jarak, diameter, dll).
Grid	Mengatur jarak antar titik referensi pada layout. Penting untuk akurasi penempatan komponen dan routing.
Layers	Menentukan lapisan yang ditampilkan/aktif. Misalnya Top, Bottom, Pads, Holes, Dimension.
Route Tool	Digunakan untuk membuat jalur koneksi antar pad (routing manual).
Auto Router	Fitur otomatis untuk membuat jalur koneksi antar komponen (kurang fleksibel untuk CNC).

Nama Tool	Fungsi
Via	Digunakan untuk membuat koneksi antar layer (biasanya untuk desain multilayer).
Export Gerber/Excellon	Menyimpan layout PCB menjadi format file produksi untuk proses milling dan drilling.

Lebar jalur		Arus (Ampere)
Inch	mm	
0,0156	0,4	1,0
0,02	0,5	1,5
0,0312	0,8	2,0
0,625	1,6	2,5
0,1	2,5	3,5
0,125	3,2	4,5
0,156	4,0	5,0
0,2	5,0	5,5
0,25	6,4	6,0

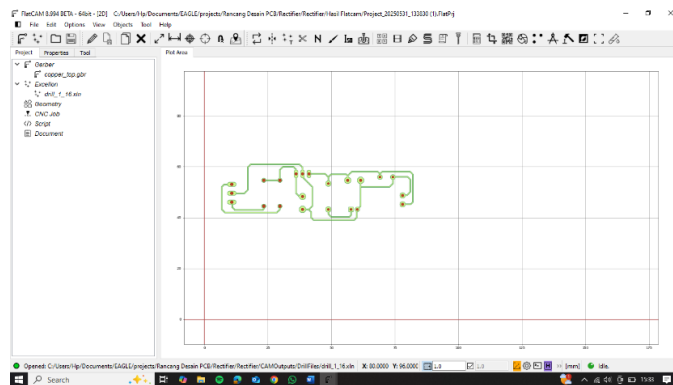
Gambar 2. 40 Tabel Lebar Jalur Rangkaian PCB

(Sumber : www.dickybmz.com)

Dalam merancang layout PCB menggunakan software Eagle, pemilihan lebar jalur (*trace width*) harus disesuaikan dengan besarnya arus listrik yang dialirkan. Jika jalur terlalu sempit untuk arus yang besar, dapat menyebabkan panas berlebih (*overheat*) dan kerusakan pada jalur.

Berdasarkan Gambar 2.40 Tabel Lebar Jalur Rangkaian PCB, jalur selebar 0,4 mm hanya mampu dilewati arus hingga 1 A, sedangkan arus 5 A memerlukan lebar minimal 4,0 mm. Oleh karena itu, pemilihan lebar jalur yang tepat sangat penting untuk menjaga keandalan dan keamanan rangkaian, terutama saat dicetak menggunakan mesin CNC.

2.2.31. Software Flatcam



Gambar 2. 41 Tampilan Software Flatcam

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

FlatCAM (*Flat Computer-Aided Manufacturing*) adalah perangkat lunak sumber terbuka (*open-source*) yang dirancang untuk memproses file hasil desain sirkuit cetak (PCB) seperti *file Gerber* dan *Excellon* menjadi *file G-code*. G-code inilah yang kemudian dikirimkan ke mesin CNC (*Computer Numerical Control*) untuk mengukir jalur tembaga, mengebor lubang, atau membersihkan area non-konduktif pada papan PCB.

FlatCAM berperan sebagai jembatan antara desain elektronik digital (biasanya dari software seperti Eagle, KiCad, Altium Designer) dan manufaktur fisik dengan mesin CNC. FlatCAM dapat mengatur parameter-parameter penting seperti ukuran dan bentuk alat potong, kedalaman pemotongan, kecepatan gerakan, dan metode pemrosesan yang sesuai dengan spesifikasi mesin.

Proses kerja FlatCAM dalam pembuatan PCB melalui mesin CNC terdiri atas beberapa tahap utama :

1. Impor File Gerber dan Excellon: File ini berisi jalur tembaga (*Gerber*) dan lubang (*Excellon*) hasil dari software desain PCB.
2. Pembuatan Isolation Routing: Jalur tembaga diukir untuk memisahkan antar jalur konduktor.
3. Pembuatan Drill File: Menentukan lokasi dan kedalaman pengeboran lubang kaki komponen.
4. *Cutout Tool* : Digunakan untuk membuat jalur pemotongan di sekitar tepi PCB agar papan dapat dipisahkan dari lembaran utama.

5. Konversi ke G-code: Semua pengaturan kemudian dikonversi menjadi file G-code yang akan dibaca oleh kontroler mesin CNC.

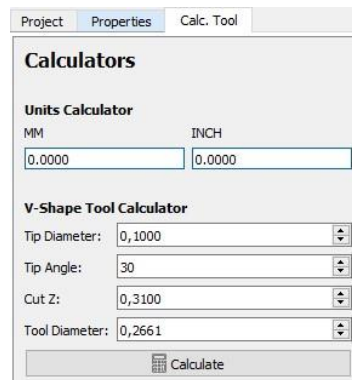
Berikut adalah label dan penjelasan parameter penting pada pengaturan FlatCAM :

Tabel 2- 12 Parameters Settings Flatcam

Isolation Tool Options (Digunakan untuk mengukir jalur tembaga dengan memisahkannya dari area sekitarnya)	
Label	Penjelasan
Tool Dia	Diameter efektif lintasan potong (dapat berupa V-bit atau tool bulat).
Tool Type	Jenis alat: V-shape (lancip) atau Circular (mata bor biasa).
V-Tip Dia	Ukuran ujung mata V-bit (semakin kecil, semakin tajam dan presisi).
V-Tip Angle	Sudut ujung mata potong V-bit (seperti 15°–90°).
Cut Z	Kedalaman pemotongan vertikal ke dalam PCB (negatif). Ditentukan otomatis oleh FlatCAM berdasarkan V-tip Diameter, V-tip Angle, dan Tool Diameter.
Passes	Jumlah lintasan yang akan dilakukan di jalur yang sama.
Overlap	Persentase tumpang tindih antar lintasan agar hasil ukiran bersih.
Milling Type	Jenis pemotongan: Climb (rekomendasi) atau Conventional.
Isolation Type	Pilihan area pengukiran: Full, External (Ext), atau Internal (Int).
Drilling Tool Options (Digunakan untuk mengebor lubang pada pad PCB)	
Label	Penjelasan
Cut Z	Kedalaman lubang bor dalam satu lintasan.
Multi-Depth	Membagi proses pengeboran menjadi beberapa tahapan untuk mengurangi beban.

Travel Z	Ketinggian posisi pahat saat tidak memotong (gerakan bebas).
Feedrate Z	Kecepatan turun/naik alat bor.
Spindle Speed	Kecepatan putar spindle dalam satuan RPM.
Toolchange	Opsi untuk menyalakan atau mematikan perintah ganti alat (M6).
Preprocessor	Format kompatibel dengan firmware CNC, misalnya GRBL 1.1 (grbl_11).
Cutout Tool (Digunakan untuk membuat jalur pemotongan di sekitar tepi PCB agar papan dapat dipisahkan dari lembaran utama)	
Label	Penjelasan
Tool Dia	Ukuran diameter alat (seperti : 0,8mm atau 1,0mm)
Cut Z	Kedalaman area pembersihan.
Multi-Depth	Membagi proses pengeboran menjadi beberapa tahapan untuk mengurangi beban.
Margin	Batas aman di sekitar jalur agar tidak terlalu dekat saat pembersihan.
GapSize	Digunakan untuk menentukan panjang celah kecil (tab) yang tidak akan dipotong agar PCB tetap menempel pada papan utama dan tidak terlepas selama proses milling.
Gap Type	• Bridge: Membuat jembatan material (tab) agar PCB tidak terlepas saat proses pemotongan selesai. • Thin: Membuat jembatan lebih tipis dari Bridge, cocok untuk PCB kecil atau material tipis. • M-Bites (Mouse Bites): Membuat lubang kecil berjajar (seperti gigitan) pada area sambungan, memudahkan pemisahan PCB secara manual setelah pemotongan.
Gaps	Jumlah <i>GapSize</i> yang akan digunakan: • Left Right (LR) • Top Bottom (TB)

	• 4 • 2LR • 2TB • 8
--	--



Gambar 2. 42 Fitur Calculators Tool Flatcam

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Di dalam FlatCAM, nilai Tool Diameter harus disesuaikan dengan geometri ujung mata pisau V-Bit (V-tip). Perhitungan Tool Diameter ini dapat dilakukan secara manual maupun menggunakan fitur Tool Calculator yang tersedia di FlatCAM. Perhitungan ini bergantung pada tiga parameter utama, yaitu :

- *V-Tip Diameter (d)* : Ukuran diameter paling ujung dari V-bit (0,1 mm).
- *V-Tip Angle (θ)* : Sudut ujung V-bit (30°).
- *Cut Z (depth)* : Kedalaman pemotongan dalam arah Z (-0,31 mm).

Adapun rumus perhitungannya Adalah :

$$\text{Tool Diameter} = d + 2 \times |Z| \times \tan \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

Dengan parameter :

- V-Tip Diameter = 0,1mm
- V-Tip angle = 30°
- Cut Z = -0,31mm

Maka :

$$\text{Tool Diameter} = 0,1 + 2 \times 0,31 \times \tan \left(\frac{30^\circ}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,1 + 2 \times 0,31 \times \tan (15^\circ) \\
 &= 0,1 + 0,62 \times 0,2679 \\
 &= 0,266098 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, berdasarkan parameter yang digunakan, diperoleh nilai Tool Diameter sebesar 0,2661 mm. Nilai ini kemudian dimasukkan ke dalam kolom Tool dia pada pengaturan Geometry Tool di FlatCAM guna menghasilkan jalur pemotongan yang akurat dan presisi.

Perhitungan Pass Step :

Untuk menghitung Pass Step (jarak antar lintasan), tentunya jumlah lintasan (passes) harus lebih dari 1. Sebagai contoh :

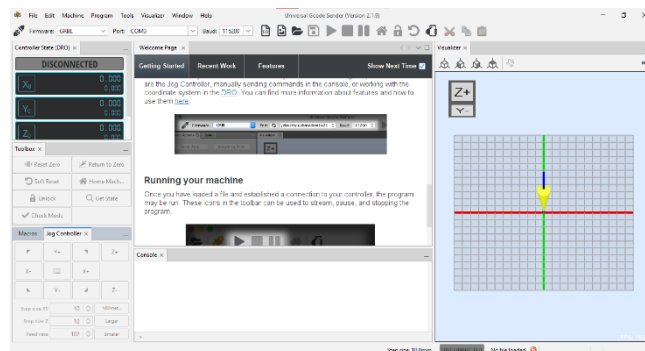
- Tool Diameter = 0,2661 mm
- Overlap = 80%

Maka :

$$\begin{aligned}
 \text{Pass Step} &= \text{Tool Dia} \times \left(1 - \frac{\text{Overlap}}{100}\right) \\
 \text{Pass Step} &= 0,2661 \times (1 - 0,80) \\
 \text{Pass Step} &= 0,0532 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Artinya, setiap lintasan tool akan bergeser 0,0532 agar menghasilkan overlap sebesar 80%. Sehingga, total lebar ukiran hasil dua passes menjadi $0,2661 + 0,0532 = 0,3193$ mm.

2.2.32. Software Universal G-Code Sender (UGS)



Gambar 2. 43 Tampilan & Menu Toolbox Software Universal Gcode Sender (UGS)

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Universal G-code Sender (UGS) adalah perangkat lunak *open-source* berbasis Java yang digunakan untuk mengontrol mesin CNC berbasis firmware GRBL. UGS berperan sebagai antarmuka komunikasi antara komputer (host) dan Arduino Uno, dapat digunakan untuk mengirim perintah G-code ke mesin secara real-time. Fungsi utama UGS :

- Mengirimkan file G-code ke Arduino Uno melalui port serial USB
- Mengontrol gerakan sumbu X, Y, Z secara manual (jogging)
- Menampilkan posisi koordinat saat ini dari mesin CNC
- Memantau status mesin: idle, run, hold, alarm
- Memberi akses ke fungsi penting: homing, unlock, reset, hold/resume

Dalam proyek mesin CNC PCB ini, UGS digunakan untuk membaca file G-code hasil output dari FlatCAM, dan kemudian mengirimkan perintah tersebut ke Arduino Uno yang sudah diprogram dengan *firmware GRBL v1.1h*. Arduino akan menerjemahkan setiap baris perintah menjadi sinyal elektronik untuk menggerakkan motor stepper serta mengontrol spindle DC.

1. Pengertian dan Cara Kerja G-code dan M-code

G-code (Geometric Code) dan *M-code (Miscellaneous Code)* adalah bahasa standar yang digunakan dalam pemrograman mesin CNC. Keduanya berisi perintah instruksi yang mengatur gerakan sumbu, aktivasi spindle, feedrate, delay, dan sebagainya.

- G-code: Mengatur Pergerakan dan Koordinat

Contoh: *G1 X10 Y20 F300*

Artinya: Gerakkan sumbu X ke 10 dan Y ke 20 dengan kecepatan 300 mm/menit.

- M-code: Perintah Fungsi Mesin

Contoh: *M3 S1000*

Artinya: Nyalakan spindle searah jarum jam dengan kecepatan 1000 RPM.

2. Contoh Program G-code

Tabel 2- 13 Contoh Program G-code

Contoh Program G-Code – Gerakan Persegi :	
(=== Program CNC: Gerakan Persegi dengan Aktivasi Spindle ===)	
G21	; Gunakan satuan mm (millimeter)
G90	; Gunakan mode posisi absolut
G92 X0 Y0 Z0	; Set posisi saat ini sebagai X0 Y0 Z0
(--- Aktifkan Spindle ---)	
M03 S1000	; Nyalakan spindle searah jarum jam dengan 1000 RPM
G4 P2	; Delay 2 detik agar spindle stabil
(--- Gerakan ke posisi awal ---)	
G0 Z5	; Naikkan Z ke atas (posisi aman)
G0 X0 Y0	; Pindah cepat ke titik awal
(--- Mulai pemotongan persegi ---)	
G1 Z-1.0 F100	; Turun ke -1 mm
G1 X20 Y0 F200	; Gerak ke kanan 20 mm
G1 X20 Y20	; Naik 20 mm
G1 X0 Y20	; Kiri 20 mm
G1 X0 Y0	; Kembali ke titik awal
(--- Selesai ---)	
G0 Z5	; Naikkan Z ke posisi aman
M05	; Matikan spindle
G0 X0 Y0	; Kembali ke titik awal
M30	; Akhiri program dan reset

3. Tabel Fungsi G-code dan M-code

Tabel 2- 14 Fungsi & Keterangan G-code

No	Kode	Fungsi	Keterangan
1.	G00	Gerakan Pemposisian Cepat	Gerakan tanpa pemotongan, untuk perpindahan antar titik.
2.	G01	Gerakan Linear Sesuai Feedrate	Gerakan pemotongan garis lurus.
3.	G02	Interpolasi Melingkar Searah Jarum Jam (CW)	Gerakan melingkar dengan arah searah jarum jam.
4.	G03	Interpolasi Melingkar Berlawanan Jarum Jam (CCW)	Gerakan melingkar dengan arah berlawanan jarum jam.
5.	G04	Jeda (Delay)	Menunda program selama waktu tertentu, misal G4 P1 = 1 detik.
6.	G10	Set Titik Nol Koordinat	Menyimpan titik nol kerja (misal G10 P0 L20 = set G54 pada posisi saat ini).
7.	G15	Pembatalan Koordinat Polar	Membatalkan mode koordinat polar.
8.	G16	Perintah Koordinat Polar	Menggunakan sistem koordinat berbasis sudut (polar).
9.	G17	Pilih Bidang XY	Menetapkan bidang kerja XY, default untuk gerakan lingkaran.
10.	G20	Input Satuan Inch	Mengatur satuan CNC ke inchi.
11.	G21	Input Satuan mm	Mengatur satuan CNC ke milimeter (default).
12.	G28	Kembali ke Titik Referensi Mesin	Gerakan menuju titik home (mesin zero).
13.	G31	Fungsi Probe	Digunakan untuk probing permukaan (biasanya untuk autoleveling).

No	Kode	Fungsi	Keterangan
14.	G40	Pembatalan Kompensasi Cutter	Menghentikan kompensasi pemotongan sisi alat.
15.	G41	Kompensasi Cutter Kiri	Alat potong bergerak di sisi kiri jalur.
16.	G42	Kompensasi Cutter Kanan	Alat potong bergerak di sisi kanan jalur.
17.	G43	Kompensasi Panjang Tool Positif	Digunakan untuk menyesuaikan panjang pahat secara positif.
18.	G44	Kompensasi Panjang Tool Negatif	Digunakan untuk menyesuaikan panjang pahat secara negatif.
19.	G45– G48	Penyesuaian Offset Tool	Digunakan untuk menaikkan/menurunkan offset tool secara manual.
20.	G49	Batal Kompensasi Panjang Tool	Menghapus kompensasi panjang alat.
21.	G52	Setting Koordinat Lokal	Offset koordinat lokal relatif terhadap sistem utama.
22.	G54– G59	Sistem Koordinat Kerja	G54 (default), G55–G59 untuk sistem koordinat kerja lainnya.
23.	G68	Rotasi Koordinat	Memutar sistem koordinat berdasarkan sumbu tertentu.
24.	G69	Pembatalan Rotasi Koordinat	Menghapus rotasi koordinat.
25.	G74	Siklus Tapping Tangan Kiri	Siklus tapping berulir tangan kiri (jarang digunakan di GRBL).

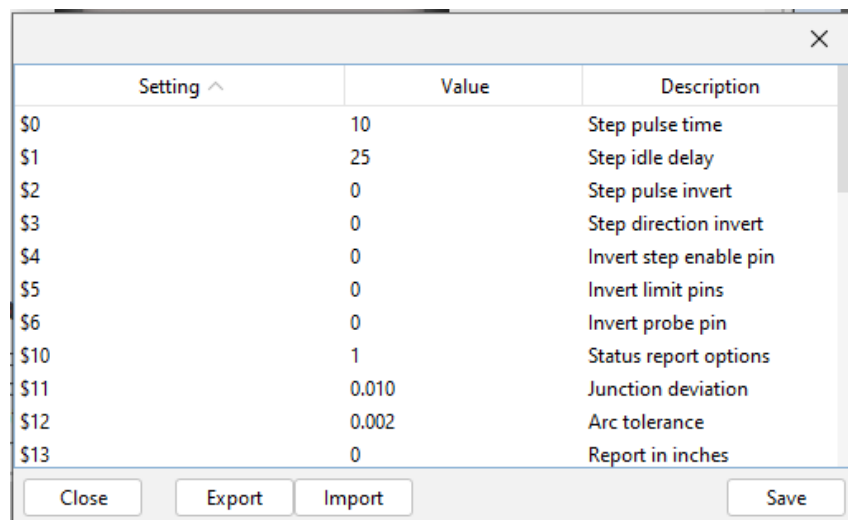
No	Kode	Fungsi	Keterangan
26.	G80	Pembatalan Siklus Pengerjaan	Menghentikan siklus pengulangan (drilling, tapping, dll).
27.	G81	Siklus Bor Standar	Membuat lubang sederhana.
28.	G82	Siklus Bor dengan Penahanan	Bor dengan waktu jeda di bagian bawah.
29.	G85	Siklus Perluasan Lubang	Bor dengan arah masuk dan keluar pelan.
30.	G90	Posisi Absolut	Semua posisi berdasarkan titik nol kerja (default GRBL).
31.	G91	Posisi Relatif	Posisi dihitung dari titik terakhir.
32.	G92	Offset Sementara	Mengatur koordinat saat ini sebagai titik nol sementara.
33.	G93	Feedrate Waktu Terbalik	Feedrate ditentukan berdasarkan waktu per blok, bukan mm/menit.
34.	G94	Feedrate per Menit	Menentukan kecepatan gerak dalam mm/menit (default GRBL).
35.	G98	Kembali ke Titik Awal	Selesai siklus kembali ke titik awal.
36.	G99	Kembali ke Titik R	Selesai siklus kembali ke titik R.
37.	Fxxx	Nilai Kecepatan Gerak	Misal F300 = 300 mm/menit. Digunakan bersamaan dengan G1.
38.	Tn	Pilih Tool	Misal T1 = tool nomor 1. Tidak berfungsi tanpa toolchanger.

Tabel 2- 15 Fungsi & Keterangan M-code

No	Kode	Fungsi	Keterangan
1.	M00	Program berhenti	Program berhenti total dan menunggu intervensi manual.
2.	M01	Program berhenti opsional	Berhenti hanya jika mode optional stop diaktifkan pada perangkat lunak.
3.	M02	Akhir program	Digunakan untuk menandai akhir program CNC.
4.	M03	Spindle berputar searah jarum jam (CW)	Menyalakan spindle ke arah searah jarum jam. Sxxx untuk atur RPM.
5.	M04	Spindle berputar berlawanan jarum jam (CCW)	Menyalakan spindle ke arah CCW. Jarang digunakan di mesin CNC PCB.
6.	M05	Spindle berhenti	Mematikan spindle sepenuhnya.
7.	M06	Ganti alat (tool)	Perintah untuk mengganti alat secara manual.
8.	M07	Coolant ON (kabut/spindle coolant)	Mengaktifkan sistem pendingin (tidak selalu didukung GRBL).
9.	M09	Coolant OFF	Mematikan semua jenis pendingin.
10.	M19	Orientasi spindle	Menyetel posisi spindle pada orientasi tertentu (jarang digunakan di GRBL).
11.	M28	Kembali ke titik referensi mesin	Digunakan untuk homing atau reset posisi.
12.	M29	Siklus tapping rigid	Perintah untuk tapping berulir (threading).
13.	M30	Akhiri program dan reset	Mengakhiri eksekusi dan mengatur ulang program serta buffer.

No	Kode	Fungsi	Keterangan
14.	M41	Pilihan gigi rendah	Digunakan untuk memilih rasio gir rendah (gearbox).
15.	M42	Pilihan gigi tinggi	Digunakan untuk memilih rasio gir tinggi.
16.	M94	Batalan cerminan gambar	Mengembalikan kondisi koordinat normal.
17.	M95	Cerminan gambar sumbu X	Membalik jalur potong terhadap sumbu X.
18.	M96	Cerminan gambar sumbu Y	Membalik jalur potong terhadap sumbu Y.
19.	M98	Panggil subprogram	Menjalankan subprogram dari file utama.
20.	M99	Akhiri subprogram	Mengakhiri subprogram dan kembali ke file utama

4. Firmware Machine UGS



Setting ^	Value	Description
\$0	10	Step pulse time
\$1	25	Step idle delay
\$2	0	Step pulse invert
\$3	0	Step direction invert
\$4	0	Invert step enable pin
\$5	0	Invert limit pins
\$6	0	Invert probe pin
\$10	1	Status report options
\$11	0.010	Junction deviation
\$12	0.002	Arc tolerance
\$13	0	Report in inches

Close Export Import Save

Gambar 2. 44 Firmware Setting Universal G-Code Sender (UGS)

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Dalam pengoperasian mesin CNC PCB ini, UGS juga menyediakan menu pengaturan firmware GRBL yang memungkinkan pengguna menyesuaikan

parameter kerja mesin. Pengaturan ini mencakup kecepatan motor, langkah per mm, akselerasi, dan fungsi homing.

Setiap parameter ditandai dengan kode \$ (*settings*) dan nilainya dapat disesuaikan agar sesuai dengan spesifikasi mekanik mesin, seperti jenis motor, pitch screw, dan mode kerja spindle. Berikut adalah tabel parameter firmware GRBL pada UGS. Parameter yang ditandai dengan warna “kuning” menunjukkan bagian yang perlu dilakukan penyesuaian (*tuning*) oleh pengguna sesuai dengan kondisi perangkat keras yang digunakan.

Tabel 2- 16 Parameter Setting Firmware UGS

Parameter	Nilai	Deskripsi Fungsi
\$0	10	Waktu pulsa step dalam mikrodetik (μ s), mempengaruhi keandalan penggerakan motor stepper
\$1	255	Delay idle sebelum motor dimatikan (ms), menjaga posisi tetap setelah bergerak
\$2	0	Inversi pulsa langkah (0 = default, 1 = dibalik)
\$3	0	Inversi arah putar motor stepper jika arah tidak sesuai
\$4	0	Membalik logika sinyal enable driver motor (umumnya tidak perlu diubah)
\$5	1	Inversi logika limit switch (aktif LOW atau HIGH)
\$6	0	Inversi logika probe (jika digunakan fitur probing)
\$10	4	Opsi laporan status (4 =
\$11	0.010	Deviasi perpotongan lintasan (semakin kecil, semakin presisi)
\$12	0.002	Toleransi interpolasi lingkaran atau arc
\$13	0	Satuan (0 = mm, 1 = inch)
\$20	1	Soft limit tidak diaktifkan
\$21	1	Hard limit tidak diaktifkan (limit switch belum digunakan penuh)
\$22	1	Homing tidak diaktifkan
\$23	3	Arah homing default

Parameter	Nilai	Deskripsi Fungsi
\$24	100.000	Kecepatan lambat saat mendekati limit switch saat homing
\$25	400.000	Kecepatan gerakan awal saat homing
\$26	250	Waktu debounce tombol limit switch (ms)
\$27	5.000	Jarak mundur setelah menyentuh limit switch
\$30	12000	Kecepatan maksimum spindle (RPM)
\$31	0	Kecepatan minimum spindle
\$32	0	Laser mode dimatikan (tidak dipakai)
\$100	80.189	Langkah/mm sumbu X (step resolution, dipengaruhi pitch ulir dan microstepping yang digunakan)
\$101	81.120	Langkah/mm sumbu Y (step resolution, dipengaruhi pitch ulir dan microstepping yang digunakan)
\$102	400.947	Langkah/mm sumbu Z (step resolution, dipengaruhi pitch ulir dan microstepping yang digunakan)
\$110	500.000	Kecepatan maksimum gerak X (mm/menit)
\$111	500.000	Kecepatan maksimum gerak Y
\$112	250.000	Kecepatan maksimum gerak Z
\$120	10.000	Akselerasi sumbu X (mm/s ²)
\$121	10.000	Akselerasi sumbu Y
\$122	10.000	Akselerasi sumbu Z
\$130	205.000	Panjang gerak maksimum X (mm)
\$131	120.000	Panjang gerak maksimum Y
\$132	45.000	Panjang gerak maksimum Z

Mesin CNC ini menggunakan mode microstepping 1/16, sehingga motor stepper NEMA 17 menghasilkan 3200 langkah per putaran penuh (200 langkah penuh $\times$ 16 microstep).

Parameter \$100, \$101, dan \$102 pada GRBL digunakan untuk mengatur *travel resolution* atau jumlah langkah per milimeter pada masing-masing sumbu X,

Y, dan Z. Nilai ini dihitung berdasarkan sistem mekanik penggerak sumbu yang digunakan

- Untuk sumbu X dan Y, digunakan sistem *pulley GT2* dengan 20 gigi dan *belt GT2* (*pitch 2 mm*). Maka perhitungannya:

$$\text{Travel Resolution X \& Y} = \frac{3200 \text{ langkah}}{20 \text{ gigi} \times 2 \text{ mm}} = 80 \text{ langkah/mm}$$

Nilai 80 tersebutlah yang digunakan untuk mengisi parameter \$I00 dan \$I01. Lalu untuk menghitung berapa mm dalam 1 step sumbu X dan Y dapat diketahui sebagai berikut :

- Karena satu rotasi motor membutuhkan 3200 mikrostep, dan jarak tempuh satu rotasi dengan sistem pulley GT2 dengan 20 gigi dan belt GT2 (*pitch 2 mm*) yaitu $20 \text{ gigi} \times 2 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$. Maka :

$$\text{Resolusi Langkah X \& Y} = \frac{20 \text{ gigi} \times 2 \text{ mm}}{3200 \text{ step}} = 0,0125 \text{ mm/step}$$

- Untuk sumbu Z, digunakan *leadscrew T8 Lead 8 mm* (*pitch 2 mm, 4 start*), sehingga dalam satu putaran penuh, *leadscrew* bergerak sejauh 8 mm. Maka:

$$\text{Travel Resolution Z} = \frac{3200 \text{ langkah}}{8 \text{ mm}} = 400 \text{ langkah/mm}$$

Nilai 400 tersebutlah yang digunakan untuk mengisi parameter \$I02. Lalu untuk menghitung berapa mm dalam 1 step sumbu Z dapat diketahui sebagai berikut :

- Karena satu rotasi motor membutuhkan 3200 mikrostep, dan jarak tempuh satu rotasi dengan sistem *leadscrew T8 Lead 8 mm* (*pitch 2 mm, 4 start*). Maka :

$$\text{Resolusi Langkah Z} = \frac{8 \text{ mm}}{3200 \text{ step}} = 0,0025 \text{ mm/step}$$

Nilai-nilai *Travel Resolution* di atas dapat disesuaikan kembali berdasarkan hasil kalibrasi aktual mesin untuk memastikan akurasi gerakan.

Selain itu, dalam *Universal G-code Sender (UGS)*, perintah seperti \$H, \$X, dan perintah lainnya yang diawali dengan tanda dolar (\$) dikenal sebagai *GRBL system commands* atau *perintah konfigurasi dan kontrol mesin*.

Perintah-perintah ini dikirim melalui Serial Monitor atau langsung melalui *UGS Console*, dan digunakan untuk mengatur berbagai parameter serta status internal firmware GRBL.

Berbeda dengan perintah G-code yang digunakan untuk menggerakkan mesin, GRBL system commands bukan bagian dari G-code, melainkan perintah khusus yang ditujukan untuk mengelola firmware, seperti mengatur langkah motor, batas area kerja, menjalankan homing, atau membuka kunci saat mesin dalam kondisi alarm.

Tabel 2- 17 Perintah \$ GRBL dan Fungsinya

Perintah	Fungsi	Keterangan
\$	Menampilkan semua perintah GRBL yang tersedia	Digunakan untuk bantuan
\$#	Menampilkan semua offset koordinat kerja	Menampilkan nilai offset G54–G59, G92, G28, G30, dsb
\$H	Homing cycle: Menggerakkan semua sumbu ke posisi 0 (jika homing diaktifkan)	Harus dijalankan saat pertama boot jika <i>\$HOMING_ENABLE</i> aktif
\$X	Unlock alarm state	Membuka kunci setelah mesin alarm, sebelum gerakan manual
\$\$	Menampilkan semua parameter setting GRBL	Misal: <i>\$100</i> , <i>\$101</i> , <i>\$110</i> dll
\$#	Menampilkan nilai offset koordinat (G54–G59, G28, G30)	Digunakan untuk probing atau touch-off
\$G	Menampilkan status modal: mode kerja, unit (mm/inch), posisi absolut/relatif	Menunjukkan mode aktif (Get State)
\$I	Menampilkan informasi firmware GRBL (versi, build, dsb)	Informasi sistem

Perintah	Fungsi	Keterangan
\$SLP	Sleep Mode	Digunakan untuk menonaktifkan motor stepper, spindle dan coolant sehingga mesin CNC masuk kondisi istirahat (sleep). Bermanfaat untuk mengurangi konsumsi daya dan panas ketika mesin tidak digunakan
\$C	Check G-code mode (G-code check mode ON/OFF)	Mode simulasi – GRBL hanya memeriksa G-code tanpa menjalankan motor
\$J=	Jogging real-time: Menggerakkan mesin CNC (sumbu X, Y & Z) secara langsung dan aman	Digunakan untuk kontrol manual (jogging) dengan mode gerak relatif (G91). Contoh: <code>\$J=G21G91X5F100</code>

Perintah ini dapat diketik secara manual di console, atau dijalankan secara otomatis oleh UGS saat koneksi ke mesin pertama kali dilakukan.

5. Status pada Console UGS

Dalam pengoperasian mesin CNC berbasis GRBL melalui *Universal G-code Sender (UGS)*, status mesin ditampilkan secara real-time melalui jendela Console, dalam bentuk baris teks status sistem yang dikirim langsung dari firmware GRBL ke komputer. Baris status ini memberikan informasi mengenai kondisi mesin, posisi sumbu, kecepatan gerak, dan status umum mesin CNC.

Tabel 2- 18 Penjelasan Komponen Status Console

Bagian	Arti
Run	Status utama mesin saat ini (Run = sedang berjalan)
MPos:X,Y,Z	<i>Machine Position</i> : posisi absolut mesin terhadap titik nol mesin (bukan kerja)

Bagian	Arti
WPos:X,Y,Z	<i>Work Position</i> : posisi relatif terhadap titik nol kerja (work zero / G54)
WCO:X,Y,Z	<i>Work Coordinate Offset</i> : nilai offset sistem kerja (hasil dari G10/G92)
FS:F,S	<i>Feedrate & Spindle</i> : nilai kecepatan gerak (F) dan spindle (S) saat ini
Pn:P	<i>Pin Status</i> : menunjukkan bahwa <i>pin probe</i> (P) sedang aktif atau tersambung ke ground, biasanya saat probe menyentuh permukaan saat proses auto-leveling atau probing.

Tabel 2- 19 Daftar Status Mode pada Console UGS (GRBL)

Status	Keterangan
Idle	Mesin aktif tapi <i>tidak sedang bergerak</i> atau menerima G-code
Run	Mesin <i>sedang menjalankan</i> perintah G-code atau jogging
Hold	Mesin <i>dijeda sementara</i> (Feed Hold), menunggu Resume
Jog	Mesin sedang bergerak manual menggunakan perintah Jog ($\$J=...$)
Alarm	Mesin <i>terkunci</i> karena kesalahan (limit switch, homing gagal, dll)
Home	Mesin sedang melakukan <i>homing cycle</i> (mencari titik nol mesin)
Check	GRBL sedang dalam G-code <i>check mode</i> ($\$C$), hanya memverifikasi G-code

Contoh Penjelasan Status :

```
<Run|WPos:9.938,5.200,11.960|FS:50,12000|Pn:P>
```

Artinya :

- Mesin dalam kondisi Run (menjalankan G-code)
- Posisi mesin saat ini: X=9.938 mm, Y=5.200 mm, Z=11.960 mm
- Feedrate = 50 mm/menit, Spindle = 12000 RPM
- Pn:P = Probe aktif (konek ke GND)