pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v21i4.xxxxx

RANCANG BANGUN MESIN CNC ROUTER UNTUK PENCETAKAN JALUR PCB BERBASIS ARDUINO UNO

Muhammad Iqbal Irsyad[1)], Yuniarto[2)]
[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
*)E-mail : *yuniartostmt@gmail.com*

ABSTRACT

This study discusses the design and construction of a CNC router for PCB trace routing based on the Arduino UNO, using a NEMA 17 stepper motor and a 775 DC spindle. The machine was designed for a working area of 200 × 100 mm and tested on three types of PCB designs: PTH, SMD, and hybrid. Test results show the accuracy of axis movement after calibration, with average errors of 0.25% (X), -0.309% (Y), and 0.45% (Z). Testing of the PCB traces revealed that small traces (0.4–0.5 mm) exhibited significant deviations of up to 253%, while traces ≥1 mm in width were relatively accurate with errors <5%. The length and width dimensions of the PCB had very small errors (<0.6%), and all traces were successfully connected. Factors contributing to the deviations included the limitations of the timing belt-based mechanical system, the FlatCAM cutting parameters, and the machine's body material. The results of this study indicate that an Arduino UNO-based CNC machine can be used for the production of simple PCBs with guaranteed connectivity, although improvements in accuracy are still needed for small-sized traces.

Keywords: *CNC Router, Arduino UNO, PCB, Accuracy, FlatCAM.*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi elektronika mendorong kebutuhan proses produksi yang presisi, efisien, dan ramah lingkungan. Salah satu komponen penting adalah Printed Circuit Board (PCB) sebagai media penghubung antar komponen elektronik. Namun, metode pembuatan PCB konvensional umumnya masih mengandalkan proses kimiawi, seperti pelarutan tembaga dengan ferri klorida ($FeCl_3$) atau penggunaan bahan berbasis DEET. Metode tersebut dinilai kurang efisien, berpotensi menimbulkan dampak negatif bagi kesehatan, serta mencemari lingkungan.

Sebagai alternatif, teknologi Computer Numerical Control (CNC) mulai diterapkan dalam proses pencetakan PCB. Mesin CNC mampu bekerja lebih akurat, bersih, dan cepat dengan membaca perintah berupa G-code untuk menggerakkan aktuator pada sumbu X, Y, dan Z. Penelitian ini berfokus pada perancangan mesin CNC skala kecil berbasis Arduino UNO, driver TMC2209, dan motor stepper NEMA 17 sebagai penggerak, dengan spindle motor DC 775 untuk proses pemotongan jalur.

Dari sisi perangkat lunak, digunakan kombinasi Eagle untuk desain PCB, FlatCAM untuk konversi Gerber ke G-code, serta Universal G-code Sender (UGS) untuk eksekusi perintah dengan firmware GRBL. Pemilihan komponen ini didasarkan pada ketersediaan luas, dukungan komunitas, dan kesederhanaan integrasi dalam workflow manufaktur PCB.

Dengan kombinasi perangkat keras dan perangkat lunak tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan mesin CNC mini untuk pencetakan jalur PCB secara presisi, serta sebagai solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan metode konvensiona.

1.2 Batasan Masalah

Adapun Batasan Masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

a. Area Kerja dan Jenis PCB
   Mesin memiliki area kerja maksimum 200 × 100 mm dan hanya digunakan untuk pembuatan jalur PCB tembaga satu sisi (single layer), tanpa dukungan multilayer, via plating, maupun solder mask.
b. Jenis dan Ukuran Tool
   Alat potong dibatasi pada V-bit 30° dengan ujung 0,1 mm untuk proses engraving dan end mill 0,8 mm untuk pengeboran, dengan parameter pemotongan ditentukan melalui FlatCAM.
c. Format Perintah Kontrol
   Sistem menggunakan firmware GRBL sehingga hanya menerima perintah dalam format G-code. File desain PCB dari Eagle dikonversi ke G-code melalui FlatCAM.

d. Akurasi Pergerakan
Sistem bekerja dengan mekanisme open-loop tanpa umpan balik posisi, dengan toleransi akurasi pergerakan sumbu X, Y, dan Z sebesar ±0,3 mm.

e. Spindle Motor
Spindle menggunakan motor DC 775 (12 VDC, 12.000 RPM) dengan kecepatan tetap, dikendalikan ON/OFF melalui modul relay tanpa kontrol kecepatan variable.

f. Jalur Minimum dan Jarak Antarjalur
Mesin ditargetkan hanya untuk jalur dengan lebar minimum 0,4 mm dan jarak antarjalur 0,6 mm sesuai keterbatasan tool V-bit dan akurasi mesin.

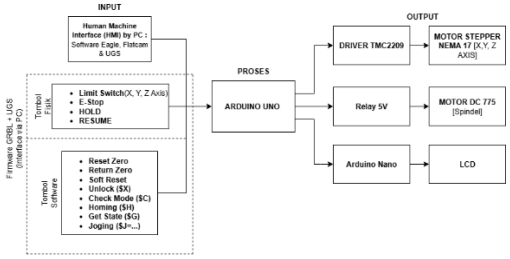
g. Jenis Desain yang Diuji
Pengujian difokuskan pada tiga desain PCB, yaitu :
- PCB PTH (jalur 0,4 mm),
- PCB SMD (jalur 0,4 mm),
- PCB gabungan PTH & SMD (jalur 0,4 mm hingga 6,4 mm)

h. Jenis Gerakan Mesin
Mesin hanya mendukung gerakan linier pada sumbu X, Y, dan Z, tanpa interpolasi rotasi maupun kontrol sumbu tambahan.

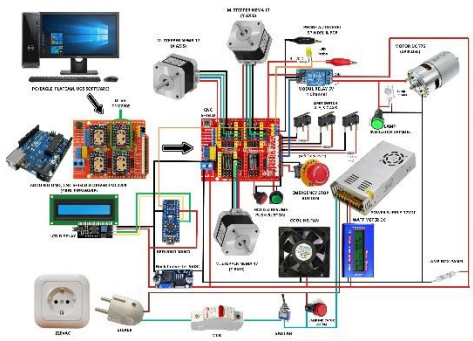
2. METODE PENELITIAN

2.1. Perancangan Mesin CNC (Computer Numerical Control) Berbasis Arduino Uno

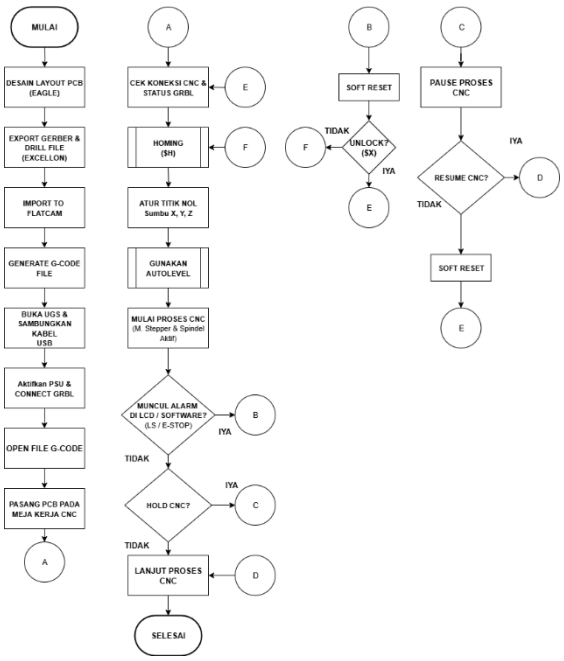
Perancangan mesin CNC (Computer Numerical Control) berbasis Arduino Uno terdiri dari beberapa tahap diantaranya Adalah perancangan diagram blok, perancangan wiring skematik dan flowchart sistem kerja yang akan ditunjukkan pada gambar berikut ini:



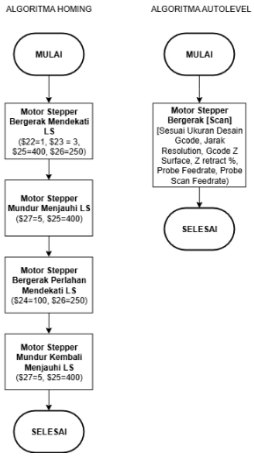
Gambar 2. 1 Diagram Blok



Gambar 2. 2 Illustrative Wiring Diagram



Gambar 2. 3 Skema Flowchart Sistem Prosedur Alat



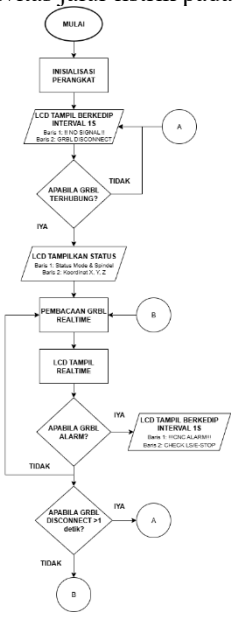
Gambar 2. 4 Flowchart Algoritma Homing & Autolevel

Sesuai dengan *Gambar 2.3* dan *Gambar 2.4*, alur kerja sistem mesin CNC Router untuk pencetakan jalur PCB dimulai dari pembuatan desain layout menggunakan Eagle, kemudian diekspor dalam format Gerber dan Excellon untuk diolah di FlatCAM hingga menghasilkan file G-code. File tersebut selanjutnya dikirim melalui *Universal G-code Sender (UGS)* ke GRBL pada Arduino UNO setelah mesin CNC terkoneksi. Sebelum proses grafir, papan PCB dipasang pada meja kerja CNC dan sistem menjalankan perintah *Homing ($H)* untuk mengembalikan posisi awal sumbu X, Y, dan Z. Setelah titik nol diatur, dilakukan proses Autolevel guna menyesuaikan kedalaman grafir dengan ketidakrataan permukaan papan.

Pada *Algoritma Homing*, motor stepper bergerak menuju limit switch dengan kecepatan seek rate, kemudian mundur sejauh

jarak *pull-off,* dan kembali mendekat dengan kecepatan *feed rate* untuk mendapatkan posisi nol yang presisi. Sedangkan *Algoritma Autolevel* melakukan pemindaian permukaan PCB menggunakan probe sesuai parameter yang ditentukan *(resolusi, feedrate, dan kedalaman Z)*. Hasil pemindaian digunakan untuk mengoreksi jalur G-code agar kedalaman pemotongan tetap konstan di seluruh area kerja.

Dengan alur ini, sistem CNC Router dapat bekerja secara sistematis mulai dari desain, kalibrasi, hingga pencetakan jalur PCB. Integrasi prosedur utama dengan algoritma homing dan autolevel memastikan akurasi dimensi jalur, kestabilan proses pemotongan, serta konektivitas jalur listrik pada papan PCB.



Gambar 2. 5 Skema Flowchart Program Alat

Sesuai dengan *Gambar 2.5*, ditunjukkan flowchart program LCD16x2 berbasis Arduino Nano yang berfungsi sebagai modul monitoring lokal pada mesin CNC. Sistem ini hanya menerima data dari pin TX Arduino UNO (CNC Shield) sehingga bersifat *read-only* tanpa memberikan umpan balik ke GRBL. Peran utama modul ini adalah menampilkan status kerja CNC secara *real-time* sehingga memudahkan operator dalam pemantauan tanpa harus bergantung pada perangkat lunak *Universal G-code Sender (UGS)*.

Proses diawali dengan inisialisasi perangkat. Apabila GRBL tidak terhubung, LCD akan menampilkan peringatan berkedip dengan pesan "*!! NO SIGNAL !!*" pada baris pertama dan "*GRBL DISCONNECT*" pada baris kedua. Setelah koneksi berhasil, Arduino Nano membaca data status GRBL dalam format standar *<...|WPos:X,Y,Z|FS:...>* yang mencakup mode operasi (*Idle, Run, Hold, Alarm, Check, Sleep*), koordinat posisi kerja (*WPos: X, Y, Z*), serta status spindle (*ON/OFF*). Informasi tersebut kemudian ditampilkan pada LCD dengan struktur: baris pertama memuat status CNC dan spindle, sedangkan baris kedua menunjukkan koordinat posisi dengan format angka desimal.

Sistem melakukan pembacaan GRBL secara berkesinambungan. Jika terjadi kondisi alarm, LCD akan menampilkan pesan "*!!! CNC ALARM !!!*" dan "*CHECK LS/E-STOP*" sebagai indikator adanya gangguan, seperti aktivasi limit switch, soft limit, atau tombol darurat (E-Stop). Apabila koneksi GRBL terputus lebih dari satu detik, LCD kembali menunjukkan status disconnect. Dengan mekanisme tersebut, modul LCD16x2 dapat berfungsi sebagai indikator status mandiri yang menyajikan informasi mode operasi, posisi koordinat, dan kondisi spindle secara ringkas, real-time, serta mudah diakses langsung pada panel mesin.

3. HASIL DAN ANALISA

Pada hasil dan analisa dilakukan pengujian pada berbagai desain PCB (PTH, SMD, dan Gabungan) dengan sembilan variasi lebar jalur, yaitu 0,4 mm, 0,5 mm, 0,8 mm, 1,6 mm, 2,5 mm, 3,2 mm, 4 mm, 5 mm, dan 6,4 mm. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi akurasi pergerakan sumbu X, Y, dan Z menggunakan vernier caliper, serta menilai kualitas hasil pencetakan jalur PCB dari segi ketepatan dimensi, kejelasan jalur, dan konektivitas antar jalur menggunakan multimeter.

3.1. Hasil dan Analisa Akurasi Pergerakan Sumbu CNC

Pengujian akurasi pergerakan sumbu CNC dilakukan dengan menggunakan nilai *travel resolution $100 = 80, $101 = 80, dan $102 = 400*, yang diperoleh dari hasil perhitungan berdasarkan sistem penggerak. Pada sumbu X dan Y digunakan mekanisme *pulley GT2* dengan 20 gigi dan *belt GT2* (pitch 2 mm), sedangkan pada sumbu Z digunakan *leadscrew T8 Lead 8 mm* (pitch 2 mm, 4 start). Pengujian akurasi dilakukan menggunakan jangka sorong digital pada masing-masing sumbu X, Y, dan Z. Setiap sumbu diuji dengan jarak perintah (target) sebesar 1 mm dan 10 mm, kemudian hasil pergerakan aktual diukur. Proses pengujian dilakukan sebanyak lima kali pengulangan untuk setiap jarak pada masing-masing sumbu.

a. Sumbu X

Tabel 3- 1 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu X (1 mm)

Sumbu X (1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	1	0,95	-0,15	**-0,05**	**-5**

Sumbu X (1 mm)					
2	1	0,92	-0,04	**-0,08**	**-8**
3	1	1,01	-0,02	**0,01**	**1**
4	1	0,94	-0,05	**-0,06**	**-6**
5	1	0,94	0,07	**-0,06**	**-6**
Total	**5**	**4,76**	**-0,19**	**0**	**-24**
Rata-rata	**1**	**0,952**	**-0,038**	**0,048**	**-4,8**

Tabel 3- 2 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu X (10 mm)

Sumbu X (10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	10	9,99	0,02	**-0,01**	**-0,1**
2	10	10,04	0,05	**0,04**	**0,4**
3	10	10,03	0,02	**0,03**	**0,3**
4	10	10,03	-0,04	**0,03**	**0,3**
5	10	10,02	-0,08	**0,02**	**0,2**
Total	**50**	**50,11**	**-0,03**	**0**	**1,1**
Rata-rata	**10**	**10,022**	**-0,006**	**0,022**	**0,22**

Tabel 3- 3 Hasil Rata-Rata Akurasi Sumbu X

Rata-Rata Gabungan Pengujian Akurasi Sumbu X (1 mm & 10mm)	
Deviasi (mm)	0,0156
Error (%)	-0,2363

Tabel 3- 4 Hasil New Travel Resolution Sumbu X

New Travel Resolution X 80,1895	
Travel Resolution lama	80
Total Target (1mm & 10mm)	55
Total Aktual (1mm & 10mm)	54,87

b. Sumbu Y

Tabel 3- 5 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu Y (1 mm)

Sumbu Y (1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	1	0,98	0,07	**-0,02**	**-2**
2	1	0,98	0,19	**-0,02**	**-2**
3	1	1,02	0,12	**0,02**	**2**
4	1	0,99	0,03	**-0,01**	**-1**
5	1	1,05	-0,18	**0,05**	**5**
Total	**5**	**5,02**	**0,23**	**0**	**2**
Rata-rata	**1**	**1,004**	**0,046**	**0,004**	**0,4**

Tabel 3- 6 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu Y (10 mm)

Sumbu Y (10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	10	9,84	-0,11	-0,16	-1,6
2	10	9,84	0,02	-0,16	-1,6
3	10	9,86	0,07	-0,14	-1,4
4	10	9,88	-0,04	-0,12	-1,2
5	10	9,8	0,04	-0,2	-2
Total	50	49,22	-0,02	-1	-7,8
Rata-rata	10	9,844	0,004	0,156	-1,56

Tabel 3- 7 Hasil Rata-Rata Akurasi Sumbu Y

Rata-Rata Gabungan Pengujian Akurasi Sumbu Y (1 mm & 10mm)	
Deviasi (mm)	-0,1414
Error (%)	-1,3818

Tabel 3- 8 Hasil New Travel Resolution Sumbu Y

New Travel Resolution Y 81,1209	
Travel Resolution lama	80
Total Target (1mm & 10mm)	55
Total Aktual (1mm & 10mm)	54,24

c. Sumbu Z

Tabel 3- 9 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu Z (-1 mm)

Sumbu Z (-1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	-1	-0,94	-0,01	0,06	-6
2	-1	-0,93	-0,01	0,07	-7
3	-1	-0,94	0,02	0,06	-6
4	-1	-0,95	0,02	0,05	-5
5	-1	-0,94	0,01	0,06	-6
Total	-5	-4,7	0,03	0	-30
Rata-rata	-1	-0,94	0,006	0,06	-6

Tabel 3- 10 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu Z (-10 mm)

Sumbu Z (-10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	-10	-9,96	0,03	**0,04**	**-0,4**
2	-10	-10,02	-0,06	**-0,02**	**0,2**
3	-10	-10,13	-0,01	**-0,13**	**1,3**

Sumbu Z (-10 mm)					
4	-10	-9,98	0,05	**0,02**	**-0,2**
5	-10	-10,08	0,01	**-0,08**	**0,8**
Total	**-50**	**-50,17**	**0,02**	**0**	**1,7**
Rata-rata	**-10**	**-10,034**	**0,004**	**-0,034**	**0,34**

Tabel 3- 11 Hasil Rata-Rata Akurasi Sumbu Z

Rata-Rata Gabungan Pengujian Akurasi Sumbu Z (-1 mm & -10 mm)	
Deviasi (mm)	0,0254
Error (%)	0,2363

Tabel 3- 12 Hasil New Travel Resolution Sumbu Z

New Travel Resolution Z 400,9476	
Travel Resolution lama	400
Total Target (1mm & 10mm)	-55
Total Aktual (1mm & 10mm)	-54,87

Setelah diperoleh nilai travel resolution terbaru untuk sumbu X, Y, dan Z, nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam pengaturan Firmware GRBL melalui perangkat lunak Universal G-Code Sender (UGS). Nilai parameter yang digunakan adalah:

- $100 = 80,1895 (sumbu X)
- $101 = 81,1209 (sumbu Y)
- $102 = 400,9476 (sumbu Z)

Akurasi pergerakan sumbu XYZ dengan menggunakan travel resolution yang telah dikalibrasi dapat dilihat pada tabel berikut :

a. Sumbu X

Tabel 3- 13 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu X (1 mm)

Hasil Kalibrasi Sumbu X (1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	1	1,02	-0,07	**0,02**	**2**
2	1	1	0,08	**0**	**0**
3	1	0,96	0,17	**-0,04**	**-4**
4	1	1,05	-0,09	**0,05**	**5**
5	1	0,97	-0,03	**-0,03**	**-3**
Total	**5**	**5**	**0,06**	**0**	**0**
Rata-rata	**1**	**1**	**0,012**	**0**	**0**

Tabel 3- 14 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu X (10 mm)

Hasil Kalibrasi Sumbu X (10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	10	10,02	-0,01	**0,02**	**0,2**
2	10	10,04	-0,04	**0,04**	**0,4**
3	10	10,03	0,1	**0,03**	**0,3**
4	10	9,99	-0,09	**-0,01**	**-0,1**
5	10	10,06	-0,02	**0,06**	**0,6**
Total	**50**	**50,14**	**-0,06**	**0**	**1,4**
Rata-rata	**10**	**10,028**	**-0,012**	**0,028**	**0,28**

Tabel 3- 15 Hasil Rata-Rata Akurasi Kalibrasi Sumbu X

Rata-Rata Gabungan Pengujian Kalibrasi Akurasi Sumbu X (1 mm & 10mm)	
Deviasi (mm)	0,0254
Error (%)	0,2545

b. Sumbu Y

Tabel 3- 16 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu Y (1 mm)

Hasil Kalibrasi Sumbu Y (1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	1	1	0,1	0	0
2	1	1,16	0,17	0,16	16
3	1	0,96	-0,04	-0,04	-4
4	1	0,92	0,06	-0,08	-8
5	1	0,95	0,08	-0,05	-5
Total	**5**	4,99	0,37	0	-1
Rata-rata	**1**	0,998	0,074	-0,002	-0,2

Tabel 3- 17 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu Y (10 mm)

Hasil Kalibrasi Sumbu Y (10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	10	9,96	0,02	-0,04	-0,4
2	10	9,97	-0,01	-0,03	-0,3
3	10	9,96	-0,03	-0,04	-0,4
4	10	9,97	0,01	-0,03	-0,3
5	10	9,98	0,03	-0,02	-0,2
Total	**50**	49,84	0,02	0	-1,6
Rata-rata	**10**	9,968	0,004	-0,032	-0,32

Tabel 3- 18 Hasil Rata-Rata Akurasi Kalibrasi Sumbu Y

Rata-Rata Gabungan Pengujian Kalibrasi Akurasi Sumbu Y (1 mm & 10mm)	
Deviasi (mm)	-0,0292
Error (%)	-0,3090

c. Sumbu Z

Tabel 3- 19 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu Z (-1 mm)

Hasil Kalibrasi Sumbu Z (-1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	-1	-0,94	0,02	0,06	-6
2	-1	-0,95	-0,01	0,05	-5
3	-1	-0,96	0,01	0,04	-4
4	-1	-0,95	-0,02	0,05	-5
5	-1	-0,95	-0,04	0,05	-5
Total	-5	-4,75	-0,04	0	-25
Rata-rata	-1	-0,95	-0,008	0,05	-5

Tabel 3- 20 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu Z (-10 mm)

Hasil Kalibrasi Sumbu Z (-10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm)	Error (%)
1	-10	-9,99	0,04	0,01	-0,1
2	-10	-10,03	0,01	-0,03	0,3
3	-10	-9,95	0,03	0,05	-0,5
4	-10	-9,99	0,01	0,01	-0,1
5	-10	-10,04	0,02	-0,04	0,4
Total	-50	-50	0,11	0	0,000
Rata-rata	-10	-10	0,022	0,000	0,000

Tabel 3- 21 Hasil Rata-Rata Akurasi Kalibrasi Sumbu Z

Rata-Rata Gabungan Pengujian Kalibrasi Akurasi Sumbu Z (-1 mm & -10mm)	
Deviasi (mm)	-0,0045
Error (%)	0,4545

Dari hasil rata-rata error (%) pengujian akurasi pergerakan sumbu XYZ sebelum dan sesudah kalibrasi, diperoleh nilai selisih yang ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 3- 22 Selisih Rata-Rata Error (%) Kalibrasi Sumbu XYZ

Bagian	Rata-Rata Error (%)		
	Sebelum Kalibrasi	Sesudah Kalibrasi	Selisih
Sumbu X	-0,2363	0,2545	**-0,4908**
Sumbu Y	-1,3818	-0,309	**-1,0728**
Sumbu Z	0,2363	0,4545	**-0,2182**

Dari pengujian akurasi sumbu X Y, Z diatas menunjukkan bahwa :

a. Sumbu X

Sebelum kalibrasi, deviasi rata-rata tercatat 0,0156 mm dengan error -0,2363%, menunjukkan pergerakan aktual sedikit lebih pendek dari target. Setelah kalibrasi (travel resolution dari 80 menjadi 80,1895 langkah/mm), deviasi meningkat menjadi 0,0254 mm dengan error 0,2545%. Hal ini menandakan adanya perbaikan akurasi, meskipun terdapat kecenderungan overshoot. Selisih rata-rata error sebesar -0,4908% memperlihatkan bahwa kalibrasi cukup efektif.

b. Sumbu Y

Pada kondisi awal, deviasi rata-rata -0,1414 mm dengan error -1,3818% menunjukkan pergerakan aktual lebih pendek dari target. Setelah kalibrasi (travel resolution dari 80 menjadi 81,1209 langkah/mm), nilai deviasi membaik menjadi -0,0292 mm dengan error -0,3090%. Selisih error sebesar -1,0728% membuktikan bahwa kalibrasi memberikan peningkatan signifikan terhadap akurasi pergerakan sumbu Y.

c. Sumbu Z

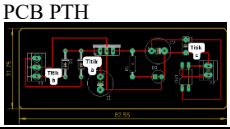
Sebelum kalibrasi, sumbu Z memiliki deviasi rata-rata 0,0254 mm dengan error 0,2363%, yang berarti pergerakan sedikit lebih panjang dari target. Setelah penyesuaian travel resolution (400 menjadi 400,9476 langkah/mm), deviasi menjadi -0,0045 mm dengan error 0,4545%. Perubahan ini menunjukkan masih adanya kecenderungan overshoot, meskipun deviasi relatif kecil. Dengan selisih error -0,2182%, hasil pengujian sumbu Z tetap dianggap memenuhi toleransi sistem sebesar ±0,3 mm.

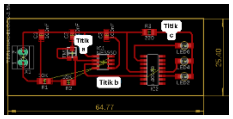
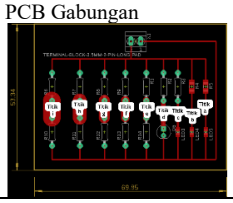
3.2. Hasil dan Analisa Jalur PCB

Pengujian hasil pencetakan jalur PCB menggunakan parameter FlatCAM pada file *copper_top* dilakukan pada tiga jenis desain, yaitu PCB PTH, PCB SMD, dan PCB Gabungan. Setiap desain diuji melalui tiga kali proses grafir untuk memperoleh data rata-rata akurasi dan presisi mesin CNC terhadap hasil jalur yang dihasilkan.

Pengujian dilakukan melalui dua pendekatan. Pertama, pengukuran dimensi lebar jalur menggunakan jangka sorong digital pada titik-titik tertentu (*sesuai desain pada Tabel 3-23*) untuk mengevaluasi tingkat akurasi hasil grafir dibandingkan dengan spesifikasi lebar jalur desain.

Tabel 3- 23 Jenis Desain PCB

No	Desain PCB	Jenis Komponen	Lebar Jalur
1	PCB PTH 	THT (Through Hole Technology)	0,4 mm

No	Desain PCB	Jenis Komponen	Lebar Jalur
2	PCB SMD 	SMD	0,4 mm
3	PCB Gabungan 	PTH & SMD	0,4 – 6,4 mm

Kedua, pengujian konektivitas jalur menggunakan multimeter, yang bertujuan memastikan tidak terdapat jalur terputus (open circuit) maupun konslet (short circuit), serta menjamin seluruh jalur mampu menghantarkan arus listrik dengan baik sesuai fungsinya. Berikut merupakan data hasil pengujian ukiran jalur PCB yang disajikan dalam bentuk tabel :

a. PCB PTH

Tabel 3- 24 Hasil Pengujian Jalur PCB PTH (Percobaan 1)

PCB PTH (Percobaan 1)					
Dimensi	**Target (mm)**	**Aktual (mm)**	**Deviasi (mm)**	**Error (%)**	**Konektivitas**
Jalur Titik a	0,4	0,34	-0,06	-15	Terhubung Semua
Jalur Titik b		0,67	0,27	67,5	
Jalur Titik c		1,33	0,93	232,5	
Panjang	82,55	82,57	0,02	0,0242	
Lebar	31,75	31,71	-0,04	-0,1259	
Total Lebar Jalur (a , b, c)	1,2	2,34	1,14	285	
Rata-Rata Lebar Jalur (a. b. c)	0,4	0,78	0,38	95	

Tabel 3- 25 Hasil Pengujian Jalur PCB PTH (Percobaan 2)

PCB PTH (Percobaan 2)					
Dimensi	**Target (mm)**	**Aktual (mm)**	**Deviasi (mm)**	**Error (%)**	**Konektivitas**
Jalur Titik a	0,4	0,4	0	0	Terhubung Semua
Jalur Titik b		0,66	0,26	65	
Jalur Titik c		1,27	0,87	217,5	
Panjang	82,55	82,54	-0,01	-0,0121	
Lebar	31,75	31,57	-0,18	-0,5669	
Total Lebar Jalur (a , b, c)	1,2	2,33	1,13	282,5	
Rata-Rata Lebar Jalur (a. b. c)	0,4	0,7766	0,3766	94,1666	

Tabel 3- 26 Hasil Pengujian Jalur PCB PTH (Percobaan 3)

PCB PTH (Percobaan 3)					
Dimensi	**Target (mm)**	**Aktual (mm)**	**Deviasi (mm)**	**Error (%)**	**Konektivitas**
Jalur Titik a	0,4	0,47	0,07	17,5	Terhubung Semua
Jalur Titik b		0,6	0,2	50	
Jalur Titik c		1,64	1,24	310	
Panjang	82,55	82,59	0,04	0,0484	
Lebar	31,75	31,49	-0,26	-0,8188	
Total Lebar Jalur (a , b, c)	1,2	2,71	1,51	377,5	
Rata-Rata Lebar Jalur (a. b. c)	0,4	0,9033	0,5033	125,8333	

Berdasarkan hasil ketiga pengujian grafir desain PTH, diperoleh nilai rata-rata sebagai berikut :

Tabel 3- 27 Hasil Rata-Rata Pengujian PCB PTH

Dimensi	Rata-Rata Lebar (mm)	Rata-Rata Deviasi (mm)	Rata-Rata Error (%)
Jalur Titik a	0,4033	0,0033	0,8333
Jalur Titik b	0,6433	0,2433	60,8333
Jalur Titik c	1,4133	1,0133	253,3333
Panjang	82,5666	0,0166	0,0201
Lebar	31,59	-0,16	-0,5039

b. PCB SMD

Tabel 3- 28 Hasil Pengujian Jalur PCB SMD (Percobaan 1)

PCB SMD (Percobaan 1)					
Dimensi	**Target**	**Aktual**	**Deviasi**	**Error (%)**	**Konektivitas**

PCB SMD (Percobaan 1)					
	(mm)	(mm)	(mm)		
Jalur Titik a		0,33	-0,07	-17,5	
Jalur Titik b	0,4	0,72	0,32	80	
Jalur Titik c		1,16	0,76	190	
Panjang	64,77	64,81	0,04	0,0617	
Lebar	25,4	25,04	-0,36	-1,4173	Terhubung Semua
Total Lebar Jalur (a , b, c)	1,2	2,21	1,01	252,5	
Rata-Rata Lebar Jalur (a. b. c)	0,4	0,7366	0,3366	84,1666	

Tabel 3- 29 Hasil Pengujian Jalur PCB SMD (Percobaan 2)

PCB SMD (Percobaan 2)					
Dimensi	**Target (mm)**	**Aktual (mm)**	**Deviasi (mm)**	**Error (%)**	**Konektivitas**
Jalur Titik a		0,38	-0,02	-5	
Jalur Titik b	0,4	0,84	0,44	110	
Jalur Titik c		1,12	0,72	180	
Panjang	64,77	64,8	0,03	0,0463	
Lebar	25,4	25,42	0,02	0,0787	
Total Lebar Jalur (a , b, c)	1,2	2,34	1,14	285	Terhubung Semua
Rata-Rata Lebar Jalur (a. b. c)	0,4	0,78	0,38	95	

Tabel 3- 30 Hasil Pengujian Jalur PCB SMD (Percobaan 3)

PCB SMD (Percobaan 3)					
Dimensi	**Target (mm)**	**Aktual (mm)**	**Deviasi (mm)**	**Error (%)**	**Konektivitas**
Jalur Titik a		0,48	0,08	20	
Jalur Titik b	0,4	0,8	0,4	100	
Jalur Titik c		1,2	0,8	200	
Panjang	64,77	64,82	0,05	0,0771	
Lebar	25,4	25,31	-0,09	-0,3543	Terhubung Semua
Total Lebar Jalur (a , b, c)	1,2	2,48	1,28	320	
Rata-Rata Lebar Jalur (a. b. c)	0,8266	0,4266	106,666	0,8266	

Berdasarkan hasil ketiga pengujian grafir desain SMD, diperoleh nilai rata-rata sebagai berikut :

Tabel 3- 31 Hasil Rata-Rata Pengujian PCB SMD

Dimensi	Rata-Rata Lebar (mm)	Rata-Rata Deviasi (mm)	Rata-Rata Error (%)
Jalur Titik a	0,3966	-0,0033	-0,8333
Jalur Titik b	0,7866	0,3866	96,66
Jalur Titik c	1,16	0,76	190
Panjang	64,81	0,04	0,0617
Lebar	25,2566	-0,1433	-0,5643

c. PCB Gabungan

Tabel 3- 32 Hasil Pengujian Jalur PCB Gabungan (Percobaan 1)

PCB Gabungan (Percobaan 1)					
Dimensi	**Target (mm)**	**Aktual (mm)**	**Deviasi (mm)**	**Error (%)**	**Konektivitas**
Jalur Titik a	0,4	0,42	0,02	5	
Jalur Titik b	0,5	0,56	0,06	12	
Jalur Titik c	0,8	0,86	0,06	7,5	
Jalur Titik d	1,6	1,65	0,05	3,125	
Jalur Titik e	2,5	2,4	-0,1	-4	
Jalur Titik f	3,2	3,14	-0,06	-1,875	Terhubung Semua
Jalur Titik g	4	3,98	-0,02	-0,5	
Jalur Titik h	5	4,9	-0,1	-2	
Jalur Titik i	6,4	6,4	0	0	
Panjang	69,85	69,87	0,02	0,0286	
Lebar	53,34	53,19	-0,15	-0,2812	

Tabel 3- 33 Hasil Pengujian Jalur PCB Gabungan (Percobaan 2)

PCB Gabungan (Percobaan 2)					
Dimensi	**Target (mm)**	**Aktual (mm)**	**Deviasi (mm)**	**Error (%)**	**Konektivitas**

Jalur Titik a	0,4	0,24	-0,16	-40	
Jalur Titik b	0,5	0,35	-0,15	-30	
Jalur Titik c	0,8	0,72	-0,08	-10	
Jalur Titik d	1,6	1,5	-0,1	-6,25	
Jalur Titik e	2,5	2,3	-0,2	-8	
Jalur Titik f	3,2	2,98	-0,22	-6,875	Terhubung Semua
Jalur Titik g	4	3,83	-0,17	-4,25	
Jalur Titik h	5	4,78	-0,22	-4,4	
Jalur Titik i	6,4	6,1	-0,3	-4,6875	
Panjang	69,85	69,48	-0,37	-0,5297	
Lebar	53,34	53,03	-0,31	-0,5811	

Tabel 3- 34 Hasil Pengujian Jalur PCB Gabungan (Percobaan 3)

PCB Gabungan (Percobaan 3)					
Dimensi	**Target (mm)**	**Aktual (mm)**	**Deviasi (mm)**	**Error (%)**	**Konektivitas**
Jalur Titik a	0,4	0,37	-0,03	-7,5	
Jalur Titik b	0,5	0,49	-0,01	-2	
Jalur Titik c	0,8	0,84	0,04	5	
Jalur Titik d	1,6	1,68	0,08	5	
Jalur Titik e	2,5	2,5	0	0	
Jalur Titik f	3,2	3,16	-0,04	-1,25	Terhubung Semua
Jalur Titik g	4	4,01	0,01	0,25	
Jalur Titik h	5	4,96	-0,04	-0,8	
Jalur Titik i	6,4	6,33	-0,07	-1,0937	
Panjang	69,85	69,94	0,09	0,1288	
Lebar	53,34	53,66	0,32	0,5999	

Berdasarkan hasil ketiga pengujian grafir desain Gabungan, diperoleh nilai rata-rata sebagai berikut :

Tabel 3- 35 Hasil Rata-Rata Pengujian PCB Gabungan

Dimensi	**Rata-Rata Lebar (mm)**	**Rata-Rata Deviasi (mm)**	**Rata-Rata Error (%)**
Jalur Titik a	0,3433	-0,0566	-14,1666
Jalur Titik b	0,4666	-0,0333	-6,6666
Jalur Titik c	0,8066	0,0066	0,8333
Jalur Titik d	1,61	0,01	0,625
Jalur Titik e	2,4	-0,1	-4
Jalur Titik f	3,0933	-0,1066	-3,3333
Jalur Titik g	3,94	-0,06	-1,5
Jalur Titik h	4,88	-0,12	-2,4
Jalur Titik i	6,2766	-0,1233	-1,9270
Panjang	69,7633	-0,0866	-0,1240
Lebar	53,2933	-0,0466	-0,0874

Dari pengujian Jalur PCB PTH, SMD dan Gabungan diatas menunjukkan bahwa :

a. Desain PCB PTH
   Pengukuran pada titik a menunjukkan akurasi tinggi dengan error 0,83%, sedangkan titik b mengalami pelebaran signifikan dengan error 60,83%. Titik c menunjukkan error paling besar, mencapai 253,33%. Dimensi papan memiliki error sangat kecil, 0,0201% (panjang) dan -0,5039% (lebar). Seluruh jalur dinyatakan terhubung dengan baik.
b. Desain PCB SMD
   Jalur titik a relatif akurat dengan error -0,83%, sedangkan titik b mengalami pelebaran dengan error 96,66%. Jalur titik c menunjukkan deviasi terbesar dengan error 190%. Dimensi papan masih akurat dengan error 0,0617% (panjang) dan -0,5643% (lebar). Konektivitas seluruh jalur tetap terjaga, termasuk untuk IC tipe SOIC.
c. Desain PCB Gabungan
   Hasil rata-rata menunjukkan jalur kecil (0,4–0,5 mm) cenderung menyempit dengan error -14,16% dan -6,67%. Jalur sedang hingga besar (≥0,8 mm) relatif akurat dengan error <5%. Dimensi papan juga sangat presisi dengan error 0,124% (panjang) dan 0,087% (lebar). Seluruh jalur dinyatakan terhubung.

Secara keseluruhan, mesin CNC mampu menghasilkan jalur PCB dengan konektivitas terjamin. Namun, akurasi menurun signifikan pada jalur berukuran sangat kecil (≤0,5 mm).

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

1. Akurasi Pergerakan Sumbu XYZ
   Setelah dilakukan kalibrasi travel resolution ($100 = 80,1895; $101 = 81,1209; $102 = 400,9476), rata-rata error menurun signifikan. Nilai error akhir adalah X = 0,25%, Y = -0,309%, dan Z = 0,45%, yang menunjukkan presisi cukup baik untuk aplikasi pencetakan PCB.

2. Pengujian Desain PCB PTH
   Jalur titik a relatif akurat dengan error 0,83%, namun titik b dan c mengalami pelebaran signifikan (20,63% dan 253,33%). Dimensi panjang dan lebar papan akurat dengan error < ±0,6%.
3. Pengujian Desain PCB SMD
   Jalur titik a mendekati target dengan error -0,83%, sementara titik b dan c melebar signifikan (47,5% dan 190%). Dimensi papan tetap akurat dengan error < ±0,6%.
4. Pengujian Desain PCB Gabungan
   Jalur besar (≥0,8 mm) akurat dengan error <5%, sedangkan jalur kecil (0,4–0,5 mm) menyempit dengan error hingga -14,16%. Dimensi papan sangat akurat dengan error <0,2%.
5. Konektivitas Jalur PCB
   Semua jalur dinyatakan terhubung (tidak terjadi open circuit maupun short circuit), sehingga fungsi rangkaian tetap tercapai meskipun terdapat deviasi ukuran jalur.
6. Faktor Penyebab Deviasi
   Deviasi dipengaruhi oleh keterbatasan mekanik (timing belt pada sumbu X–Y, serta material body berbasis filamen plastik), dan parameter FlatCAM (Cut Z, overlap, tool diameter).

4.2. Saran

1. Peningkatan Mekanik
   Mengganti sistem penggerak timing belt dan rangka filamen dengan bahan yang lebih rigid agar pergerakan lebih stabil dan akurat terutama pada jalur kecil.
2. Optimasi Perangkat Lunak dan Parameter
   Melakukan penyesuaian parameter Cut Z, overlap, dan feedrate secara lebih presisi melalui uji coba tambahan, serta melakukan kalibrasi lanjutan pada travel resolution ($100–$102) untuk meningkatkan akurasi pergerakan sumbu

DAFTAR PUSTAKA

1. Camachem, *"Frequently Asked Questions About Ferric Chloride,"* [Online]. Available: https://camachem.com/en/blog/post/frequently-asked-question-about-ferric-chloride.[Accessed: 04-Mar-2025].
2. Mama's Choice, *"Bahaya DEET pada Lotion Anti Nyamuk,"* [Online]. Available: https://mamaschoice.id/article/bahaya-deet/ [Accessed: 04-Mar-2025].
3. S. Supriyati, T. Pramuji, I. Saputro, dan L. R. Hidayati, *"Rancang Bangun CNC (Computer Numerical Control) untuk Pembuatan PCB Berbasis Arduino,"* Orbith, vol. 19, no. 2, pp. 114–120, Jul. 2023.
4. M. R. A. Hasibuan, M. Muhaimin, dan S. Hardi, *"Rancang Bangun Mesin CNC Milling 3-Axis untuk Engrave PCB Berbasis Arduino Uno,"* Jurnal TEKTRO, vol. 3, no. 1, pp. 40–47, Mar. 2019.
5. I. Malik, S. Effendi, dan S. Witjahjo, *"Rancang Bangun Mesin CNC Engraver Mini Sebagai Alat Bantu Pembelajaran,"* Jurnal Teknika, vol. 13, no. 01, pp. 69–74, Jun. 2019.
6. Gnea GRBL Developers, *"grbl: An open source, embedded, high performance g-code parser and CNC milling controller,"* GitHub Repository, 2016. [Online]. Available: https://github.com/gnea/grbl. [Accessed: 04-Mar-2025].
7. - Handson Technology, *"775 Ball Bearing DC Motor: Data Specifications,"* [Online]. Available: https://handsontec.com/dataspecs/775-Motor.pdf. [Accessed: 14-Apr-2025].
8. Rajguru Electronics, *"CNC shield for A4988,"* rajguruelectronics.com, [Online]. Available: https://rajguruelectronics.com. [Accessed: 14-Apr-2025].
9. Trinamic Motion Control GmbH & Co. KG, *TMC2209 Datasheet – SilentStepStick Series*, Rev. 1.09, Hamburg, Germany, 2020.
10. NINGBO LEISON MOTOR CO., LIMITED, *17HS Hybrid Stepper Motor Datasheet*, [Online]. Available: https://www.alldatasheet.com. [Accessed: 14-Apr-2025].
11. D. Kharisma, *"Cara Setting Vref TMC2209 Tanpa UART,"* YouTube, Jul. 21, 2023. [Online]. Available: https://youtu.be/VcyGzXIZm58?si=Y5FS7uIOpocfYHy6. [Accessed: 02-May-2025].
12. GRBL Developers, *"grbl: An open source, embedded, high performance g-code-parser and CNC milling controller written in optimized C,"* GitHub Repository. [Online]. Available: https://github.com/grbl/grbl. [Accessed: 07-May-2025].
13. Arduino, *"Arduino UNO R3,"* Arduino Documentation, [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/. [Accessed: 07-May-2025].
14. Arduino, *"Arduino Nano,"* Arduino Documentation, [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/hardware/nano/. [Accessed: 07-May-2025].
15. Components101, *"5V Single Channel Relay Module – Pinout, Features, Applications & Working,"*

Components101.com. [Online]. Available: https://components101.com/switches/5v-single-channel-relay-module-pinout-features-applications-working-datasheet. [Accessed: 19-May-2025].
16. DickyBMZ, *"Design PCB Menggunakan Cadsoft Eagle,"* dickybmz.com, Jun. 24, 2017. [Online]. Available: https://www.dickybmz.com/2017/06/design-pcb-menggunakan-cadsoft-eagle.html. [Accessed: 19-May-2025].
17. Solo Abadi, *"8 Macam Jenis Mesin CNC yang Perlu Kamu Tahu,"* SoloAbadi.com. [Online]. Available: https://soloabadi.com/8-macam-jenis-mesin-cnc-yang-perlu-kamu-tahu/. [Accessed: 19-May-2025].
18. TechTarget, *"What is a printed circuit board (PCB)?,"* TechTarget WhatIs. [Online]. Available: https://www.techtarget.com/whatis/definition/printed-circuit-board-PCB. [Accessed: 24-May-2025].
19. Indotech Group, *"Tabel G-Code pada Mesin CNC Milling,"* Indotech Group. [Online]. Available: https://indotech-group.co.id/tabel-g-code-pada-mesin-cnc-milling/. [Accessed: 11-Jun-2025].
20. Indotech Group, *"Tabel M-Code pada Mesin CNC Milling,"* Indotech Group. [Online]. Available: https://indotech-group.co.id/tabel-m-code-pada-mesin-cnc-milling/. [Accessed: 11-Jun-2025].
21. GRBL Community, *"GRBL Serial Buffer Issue #302,"* GitHub Issues. [Online]. Available: https://github.com/gnea/grbl/issues/302. [Accessed: 04-Jul-2025].
22. GRBL Contributors, *"GRBL Interface Documentation,"* GitHub Docs. [Online]. Available: https://github.com/gnea/grbl/blob/master/doc/markdown/interface.md. [Accessed: 04-Jul-2025].
23. OpenBuilds Forum, *"Ask GRBL CNC Questions Here – Page 35,"* OpenBuilds Community Forum. [Online]. Available: https://builds.openbuilds.com/threads/ask-grbl-cnc-questions-here.3000/page-35. [Accessed: 04-Jul-2025].