

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1. Tujuan Pengujian dan Pengukuran

Tujuan dari pengujian dan pengukuran ini adalah untuk memastikan bahwa mesin CNC Router yang telah dirancang mampu mencetak jalur PCB secara presisi serta berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Pengujian dilakukan 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 sebagaimana ditunjukkan pada *Gambar 2.40*. 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.

Selain itu, pengukuran juga bertujuan untuk memverifikasi sinkronisasi antara sistem mekanik dan sistem kendali berbasis Arduino UNO yang terintegrasi dengan driver TMC2209 dan software pendukung seperti Eagle, GRBL, FlatCAM, serta *Universal G-Code Sender (UGS)*. Dengan pengujian yang dilakukan secara menyeluruh, diharapkan alat dapat bekerja secara stabil, akurat, dan dapat diandalkan dalam mencetak berbagai desain layout PCB.

5.2. Peralatan Pengujian dan Pengukuran

Pengujian dan pengukuran pada alat mesin CNC ini memerlukan beberapa peralatan pendukung untuk memastikan akurasi dimensi, kelistrikan, dan evaluasi kinerja alat. Berikut adalah peralatan yang digunakan dalam proses pengujian dan pengukuran :

1. Multimeter Digital
Digunakan untuk mengukur tegangan, arus, serta memastikan konektivitas antar jalur PCB hasil pencetakan.
2. Jangka Sorong Digital (Vernier Caliper)
Digunakan untuk mengukur dimensi hasil pencetakan jalur PCB serta mengevaluasi akurasi gerakan sumbu X, Y, dan Z.

3. Laptop

Digunakan untuk mengoperasikan software pendukung seperti Universal G-Code Sender (UGS), FlatCAM, Eagle, dan Arduino IDE dalam proses pengujian serta pemantauan kinerja mesin CNC.

5.3. Prosedur Pengujian dan Pengukuran

Sebelum dilakukan proses pengujian dan pengukuran, diperlukan prosedur kerja yang sistematis untuk mencegah kesalahan dan memastikan hasil pengukuran yang akurat. Prosedur ini mencakup langkah-langkah penting mulai dari persiapan alat, proses pengujian, hingga analisis data. Adapun prosedur pengujian dan pengukuran mesin CNC ini sebagai berikut :

1. Persiapan Alat

Siapkan seluruh peralatan yang dibutuhkan, seperti laptop dengan software UGS, multimeter digital, dan jangka sorong digital. Pastikan koneksi USB ke Arduino UNO terhubung dan GRBL telah diunggah dengan benar.

2. Pengujian Fungsi Gerak Sumbu XYZ

Nyalakan mesin CNC dan aktifkan koneksi di UGS. Uji gerakan motor stepper pada sumbu X, Y, dan Z menggunakan perintah jog pada UGS, kemudian ukur jarak perpindahan aktual menggunakan jangka sorong digital untuk memverifikasi akurasi *travel resolution*.

3. Proses Eksekusi G-Code

Proses ini dilakukan dengan mengunggah file G-code hasil olahan dari FlatCAM ke perangkat lunak *Universal G-code Sender (UGS)*, kemudian menjalankan proses pencetakan jalur PCB menggunakan mesin CNC. Selama proses berlangsung, dilakukan pengamatan terhadap pergerakan mesin, kestabilan putaran spindle motor, dan keakuratan hasil cetak jalur pada media PCB.

Fokus pengujian ditujukan untuk mengevaluasi dimensi jalur hasil grafir berdasarkan file *copper_top* dari masing-masing desain PCB berikut:

- a. Desain PCB PTH: Menggunakan semua komponen jenis PTH dengan desain jalur konstan selebar 0,4 mm.
- b. Desain PCB SMD: Menggunakan semua komponen jenis SMD dengan desain jalur konstan selebar 0,4 mm.
- c. Desain PCB Gabungan: Menggunakan kombinasi komponen SMD dan PTH dengan desain jalur bervariasi, 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.

4. Pengujian Hasil Jalur PCB

Setelah proses pencetakan selesai, lakukan pemeriksaan dimensi jalur menggunakan jangka sorong digital dan uji konektivitas jalur menggunakan multimeter untuk memastikan tidak ada jalur yang putus atau konslet. Pengujian dilakukan pada berbagai desain PCB yang dirancang untuk komponen jenis PTH dan SMD guna memastikan keandalan proses dan fleksibilitas penggunaan mesin CNC.

5. Pencatatan dan Dokumentasi

Semua hasil pengukuran dicatat dan didokumentasikan dalam bentuk foto sebagai bukti pendukung serta bahan analisa. Data dicocokkan dengan desain awal untuk menilai keberhasilan sistem secara keseluruhan.

6. Analisis Hasil

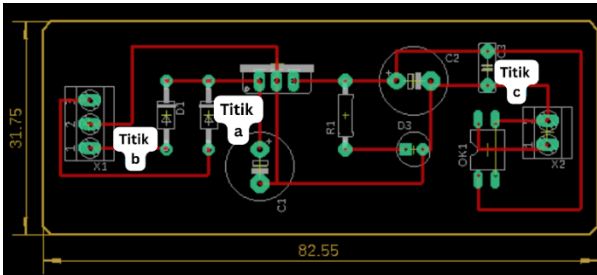
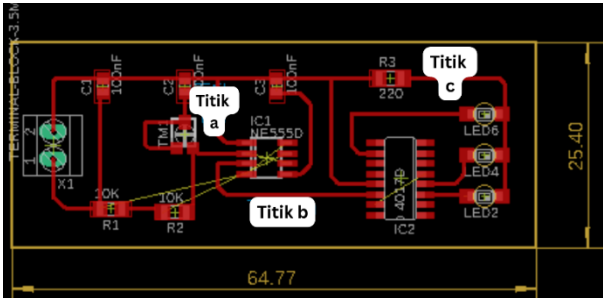
Bandingkan hasil pencetakan dengan desain asli dari Eagle untuk menentukan tingkat akurasi. Evaluasi deviasi pergerakan, kualitas jalur, serta respon sistem terhadap G-code, dan identifikasi potensi kesalahan atau koreksi yang diperlukan.

5.4. Pengujian dan Analisa Alat

5.4.1. Metodologi Pengujian

Pengujian dilakukan terhadap 3 jenis desain PCB :

Tabel 5- 1 Jenis Desain PCB

NO	DESAIN PCB BERBASIS EAGLE	JENIS KOMPONEN	LEBAR JALUR
1.	PCB PTH  Dimensi : 82,55mm × 31,75mm	THT (Through Hole Technology)	0,4 mm
2.	PCB SMD  Dimensi : 66,77mm × 25,4mm	SMD	0,4 mm
3.	PCB Gabungan PTH & SMD	Campuran	a. 0,4 mm b. 0,5 mm c. 0,8 mm d. 1,6 mm

NO	DESAIN PCB BERBASIS EAGLE	JENIS KOMPONEN	LEBAR JALUR
	Dimensi : 69,85mm × 53,34mm		e. 2,5 mm f. 3,2 mm g. 4,0 mm h. 5,0 mm i. 6,4 mm

Pengukuran dilakukan menggunakan jangka sorong digital (vernier caliper) dengan ketelitian 0,01 mm untuk mengukur lebar jalur hasil ukiran pada titik-titik yang telah ditentukan. Hasil pengukuran aktual kemudian dibandingkan dengan data desain dari Eagle CAD (target). Seluruh proses konversi dan pemrosesan G-code dilakukan menggunakan FlatCAM, dan G-code dikirimkan ke mesin CNC melalui software *Universal G-code Sender (UGS)*.

5.4.2. Parameter FlatCAM

Pada setiap desain PCB Eagle (Desain PCB PTH, PCB SMD, dan PCB Gabungan), digunakan tiga jenis file output utama, yaitu: *copper_top*, *drill*, dan *profile*. Masing-masing file memiliki parameter FlatCAM dan jenis mata bor (*tool*) yang berbeda, disesuaikan dengan fungsi pemrosesan setiap file.

Dalam pengujian ini, digunakan parameter yang konstan untuk setiap jenis file dan desain PCB guna menjaga konsistensi serta akurasi perbandingan hasil. Jenis mata bor yang digunakan adalah sebagai berikut :

- V-bit 30° untuk file *copper_top* (proses engrave/jalur)
- End mill 0,8 mm untuk file *drill* (lubang) dan *profile* (pemotongan kontur)

Penggunaan parameter dan jenis mata bor yang sama pada ketiga desain PCB dimaksudkan untuk mengukur keandalan kinerja mesin CNC dalam kondisi kerja yang seragam.

Selanjutnya, berikut adalah parameter FlatCAM yang digunakan secara konstan pada file *copper_top* untuk ketiga desain PCB. Hasil dari file ini nantinya akan diuji melalui proses pengukuran dimensi jalur hasil grafir :

Tabel 5- 2 Parameter Flatcam pada Layer Copper_top untuk Isolation Tool dan Geometry Object

PARAMETER	NILAI
Tool Type	V-Bit 30° (Ujung 0,1 mm)
Tool Diameter	0,2661mm
V-Tip Diameter	0,1 mm
V-Tip Angle	30°
Cut Z	-0,31 mm (nilai ini dihasilkan secara otomatis oleh FlatCAM berdasarkan parameter <i>V-tip Diameter</i> , <i>V-tip Angle</i> , dan <i>Tool Diameter</i> yang digunakan)
Travel Z	2 mm
Multi Depth	0,06 mm (6×)
Overlap	80%
Passes	2
Offset	Out
Feedrate X-Y, Z	100 mm/min, 50 mm/min
Spindle Speed	12.000 RPM
Preprocessor	Grbl_11

Nilai *Tool Diameter* sebesar 0,2661 mm dapat diperoleh berdasarkan 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).

Nilai tersebut dapat dihitung secara manual menggunakan rumus geometri segitiga atau melalui fitur *Tool Calculator* yang tersedia di FlatCAM, seperti dijelaskan pada bagian *Dasar Teori 2.2.31 – Software FlatCAM*.

5.4.3. Pengujian 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 perhitungan pada *Dasar Teori 2.2.32 – Software Universal G-Code Sender*, subbagian *Firmware Machine UGS*.

Pengujian dilakukan menggunakan alat ukur 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 diukur hasil pergerakannya. Proses ini dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan untuk setiap jarak pada masing-masing sumbu.



Gambar 5. 1 Proses Pengukuran Akurasi Pergerakan Sumbu CNC

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Dan dari hasil pengujian ini, diperoleh data akurasi pergerakan sumbu XYZ yang dapat digunakan untuk melakukan evaluasi dan dapat dikalibrasi ulang nilai *travel resolution* agar pergerakan mesin CNC semakin presisi.

a. Sumbu X

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

SUMBU X (1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
1	1	0,95	-0,15	-0,05	-5
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 5- 4 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu X (10 mm)

SUMBU X (10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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 5- 5 Hasil Rata-Rata Akurasi Sumbu X

RATA-RATA GABUNGAN PENGUJIAN AKURASI SUMBU X (1 mm & 10 mm) ((Rata-rata Uji 1mm x 1mm x 5 percobaan)) + (Rata-rata 10mm x 10mm x5 percobaan) / (Total Target)	
Deviasi (mm)	0,0156
Error (%)	-0,2363

Tabel 5- 6 Hasil New Travel Resolution Sumbu X

NEW TRAVEL RESOLUTION X (Travel Resolution Lama (Total Target/Total Aktual))	
80,1895	
Travel Resolution lama	80
Total Target (1mm & 10mm)	55
Total Aktual (1mm & 10mm)	54,87

b. Sumbu Y

Tabel 5- 7 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu Y (1 mm)

SUMBU Y (1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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

SUMBU Y (1 mm)					
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 5- 8 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu Y (10 mm)

SUMBU Y (10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah h]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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 5- 9 Hasil Rata-Rata Akurasi Sumbu Y

RATA-RATA GABUNGAN PENGUJIAN AKURASI SUMBU Y (1 mm & 10 mm) ((Rata-rata Uji 1mm x 1mm x 5 percobaan)) + (Rata-rata 10mm x 10mm x5 percobaan) / (Total target)	
Deviasi (mm)	-0,1414
Error (%)	-1,3818

Tabel 5- 10 Hasil New Travel Resolution Sumbu Y

NEW TRAVEL RESOLUTION Y (Travel Resolution Lama (Total Target/Total Aktual))	
81,1209	
Travel Resolution lama	80
Total Target (1mm & 10mm)	55
Total Aktual (1mm & 10mm)	54,24

c. Sumbu Z

Tabel 5- 11 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu Z (-1 mm)

SUMBU Z (-1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah]	Error (%) [Devias i /Jarak Perinta h × 100%]
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 5- 12 Hasil Akurasi Pergerakan Sumbu Z (-10 mm)

SUMBU Z (-10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah]	Error (%) [Devias i/Jarak Perinta h × 100%]
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
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 5- 13 Hasil Rata-Rata Akurasi Sumbu Z

RATA-RATA GABUNGAN PENGUJIAN AKURASI SUMBU Z (-1 mm & -10 mm) ((Rata-rata Uji 1mm x 1mm x 5 percobaan)) + (Rata-rata 10mm x 10mm x5 percobaan) / (Total target)	
Deviasi (mm)	0,0254
Error (%)	0,2363

Tabel 5- 14 Hasil New Travel Resolution Sumbu Z

NEW TRAVEL RESOLUTION Z (Travel Resolution Lama (Total Target/Total Aktual))	
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 5- 15 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu X (1 mm)

HASIL KALIBRASI SUMBU X (1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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 5- 16 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu X (10 mm)

HASIL KALIBRASI SUMBU X (10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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 5- 17 Hasil Rata-Rata Akurasi Kalibrasi Sumbu X

RATA-RATA GABUNGAN PENGUJIAN KALIBRASI SUMBU X (1 mm & 10 mm) ((Rata-rata Uji 1mm x 1mm x 5 percobaan)) + (Rata-rata 10mm x 10mm x5 percobaan) / (Total target)	
Deviasi (mm)	0,0254
Error (%)	0,2545

b. Sumbu Y

Tabel 5- 18 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu Y (1 mm)

HASIL KALIBRASI SUMBU Y (1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah h]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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 5- 19 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu Y (10 mm)

HASIL KALIBRASI SUMBU Y (10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah h]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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

HASIL KALIBRASI SUMBU Y (10 mm)					
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 5- 20 Hasil Rata-Rata Akurasi Kalibrasi Sumbu Y

RATA-RATA GABUNGAN PENGUJIAN KALIBRASI SUMBU Y (1 mm & 10 mm) ((Rata-rata Uji 1mm x 1mm x 5 percobaan)) + (Rata-rata 10mm x 10mm x5 percobaan) / (Total target)	
Deviasi (mm)	-0,0292
Error (%)	-0,3090

c. Sumbu Z

Tabel 5- 21 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu Z (-1 mm)

HASIL KALIBRASI SUMBU Z (-1 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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

HASIL KALIBRASI SUMBU Z (-1 mm)					
Total	-5	-4,75	-0,04	0	-25
Rata-rata	-1	-0,95	-0,008	0,05	-5

Tabel 5- 22 Hasil Akurasi Kalibrasi Pergerakan Sumbu Z (-10 mm)

HASIL KALIBRASI SUMBU Z (-10 mm)					
Percobaan	Target (mm)	Aktual (mm)	Backlash (mm)	Deviasi (mm) [Jarak real – Jarak Perintah h]	Error (%) [Deviasi /Jarak Perintah × 100%]
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 5- 23 Hasil Rata-Rata Akurasi Kalibrasi Sumbu Z

RATA-RATA GABUNGAN PENGUJIAN KALIBRASI SUMBU Z (-1 mm & -10 mm) ((Rata-rata Uji 1mm x 1mm x 5 percobaan)) + (Rata-rata 10mm x 10mm x5 percobaan) / (Total target)	
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 :

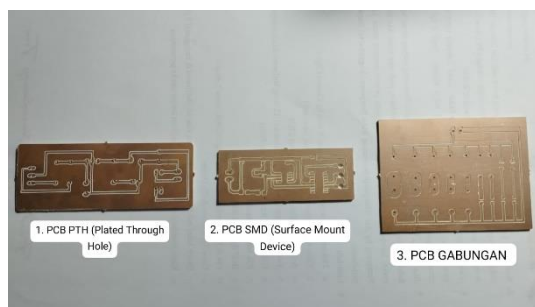
Tabel 5- 24 Hasil Rata-Rata Error Akurasi Sumbu CNC (%)

Rata-Rata Error Akurasi Sumbu Mesin CNC (%)			
Bagian	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

Tabel 5- 25 Hasil Rata-Rata Mutlak Error Akurasi Mesin CNC (%)

Rata-Rata Mutlak Error Akurasi Mesin CNC (%) [X, Y, Z Axis]		
Sebelum Kalibrasi	Sesudah Kalibrasi	Selisih
0,618133333	0,339333333	0,2788

5.4.4. Pengujian Jalur PCB



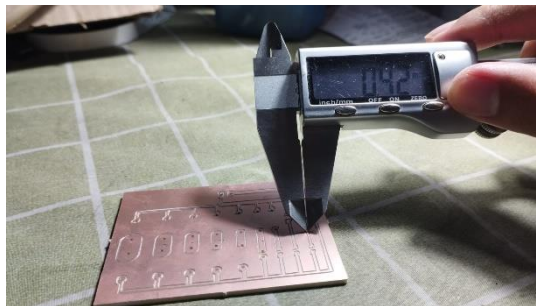
Gambar 5. 2 Hasil Pengujian PCB

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

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, seperti ditunjukkan pada *Gambar 5.7*. Setiap desain diuji melalui tiga kali proses grafir untuk memperoleh data rata-rata akurasi dan presisi

mesin CNC terhadap hasil jalur PCB Pengujian ini dilakukan melalui dua pendekatan :

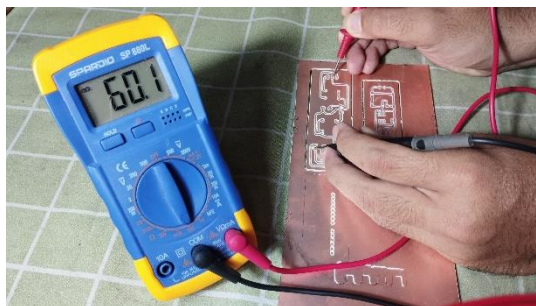
Pertama, dilakukan pengukuran dimensi lebar jalur menggunakan jangka sorong digital pada titik-titik jalur PCB tertentu sesuai gambar desain *Tabel 5-1*, untuk mengevaluasi tingkat akurasi hasil grafir dibandingkan dengan spesifikasi lebar jalur pada desain.



Gambar 5. 3 Proses Pengukuran Lebar Jalur PCB

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Kedua, dilakukan pengujian konektivitas jalur menggunakan multimeter untuk memastikan tidak terdapat jalur yang terputus (*open circuit*) maupun konslet (*short circuit*), serta untuk memastikan bahwa seluruh jalur dapat menghantarkan arus listrik dengan baik sesuai fungsinya.



Gambar 5. 4 Proses Pengukuran Konektivitas Jalur PCB

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Berikut merupakan data hasil pengujian ukiran jalur PCB yang disajikan dalam bentuk tabel. Data tersebut mencakup berbagai jenis desain PCB serta titik-titik pengukuran jalur yang telah ditentukan sebelumnya.

a. Desain PCB PTH

Tabel 5- 26 Hasil Pengujian Jalur PCB PTH (Percobaan 1)

PCB PTH (Percobaan 1)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukuran]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	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 5- 27 Hasil Pengujian Jalur PCB PTH (Percobaan 2)

PCB PTH (Percobaan 2)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukuran]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	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 5- 28 Hasil Pengujian Jalur PCB PTH (Percobaan 3)

PCB PTH (Percobaan 3)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukuran]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	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 5- 29 Hasil Rata-Rata Pengujian PCB PTH

Dimensi	Rata-Rata Lebar (mm)	Rata-Rata Deviasi (mm)	Rata-Rata Error (%)
Jalur Titik a (0,4 mm)	0,4033	0,0033	0,8333
Jalur Titik b (0,4 mm)	0,6433	0,2433	60,83
Jalur Titik c (0,4 mm)	1,4133	1,0133	253,3333
Panjang (82,55 mm)	82,5666	0,0166	0,0201
Lebar (31,75 mm)	31,59	-0,16	-0,5039

b. Desain PCB SMD

Tabel 5- 30 Hasil Pengujian Jalur PCB SMD (Percobaan 1)

PCB SMD (Percobaan 1)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukuran]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	Konektivitas
Jalur Titik a	0,4	0,33	-0,07	-17,5	
Jalur Titik b		0,72	0,32	80	
Jalur Titik c		1,16	0,76	190	

PCB SMD (Percobaan 1)					
Panjang	64,77	64,81	0,04	0,0617	Terhubung Semua
Lebar	25,4	25,04	-0,36	-1,4173	
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 5- 31 Hasil Pengujian Jalur PCB SMD (Percobaan 2)

PCB SMD (Percobaan 2)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukuran]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	Konektivitas
Jalur Titik a	0,4	0,38	-0,02	-5	
Jalur Titik b		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	

PCB SMD (Percobaan 2)					
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 5- 32 Hasil Pengujian Jalur PCB SMD (Percobaan 3)

PCB SMD (Percobaan 3)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukuran]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	Konektivitas
Jalur Titik a	0,4	0,48	0,08	20	Terhubung Semua
Jalur Titik b		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	
Total Lebar	1,2	2,48	1,28	320	

PCB SMD (Percobaan 3)					
Jalur (a, b, c)					
Rata- Rata Lebar Jalur (a, b, c)	0,4	0,8266	0,4266	106,666 6	

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

Tabel 5- 33 Hasil Rata-Rata Pengujian PCB SMD

Dimensi	Rata-Rata Lebar (mm)	Rata-Rata Deviasi (mm)	Rata-Rata Error (%)
Jalur Titik a (0,4 mm)	0,3966	-0,0033	-0,8333
Jalur Titik b (0,4 mm)	0,7866	0,3866	96,66
Jalur Titik c (0,4 mm)	1,16	0,76	190
Panjang (64,77 mm)	64,81	0,04	0,0617
Lebar (25,4 mm)	25,2566	-0,1433	-0,5643

c. Desain PCB Gabungan

Tabel 5- 34 Hasil Pengujian Jalur PCB Gabungan (Percobaan 1)

PCB Gabungan (Percobaan 1)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukuran]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	Konektivitas
Jalur Titik a	0,4	0,42	0,02	5	Terhubung Semua
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	
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 5- 35 Hasil Pengujian Jalur PCB Gabungan (Percobaan 2)

PCB Gabungan (Percobaan 2)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukur an]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	Konektivitas
Jalur Titik a	0,4	0,24	-0,16	-40	Terhubung Semua
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	
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 5- 36 Hasil Pengujian Jalur PCB Gabungan (Percobaan 3)

PCB Gabungan (Percobaan 3)					
Dimensi	Target (mm)	Aktual (mm) [Sesuai Titik Pengukuran]	Deviasi (mm) [Aktual – Target]	Error (%) [Deviasi / Target × 100%]	Konektivitas
Jalur Titik a	0,4	0,37	-0,03	-7,5	Terhubung Semua
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	
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 5- 37 Hasil Rata-Rata Pengujian PCB Gabungan

Dimensi	Rata-Rata Lebar (mm)	Rata-Rata Deviasi (mm)	Rata-Rata Error (%)
Jalur Titik a (0,4 mm)	0,3433	-0,0566	-14,1666
Jalur Titik b (0,5 mm)	0,4666	-0,0333	-6,6666
Jalur Titik c (0,8 mm)	0,8066	0,0066	0,8333
Jalur Titik d (1,6 mm)	1,61	0,01	0,625
Jalur Titik e (2,5 mm)	2,4	-0,1	-4
Jalur Titik f (3,2 mm)	3,0933	-0,1066	-3,3333
Jalur Titik g (4,0 mm)	3,94	-0,06	-1,5
Jalur Titik h (5,0 mm)	4,88	-0,12	-2,4
Jalur Titik i (6,4 mm)	6,2766	-0,1233	-1,9270
Panjang (69, 85 mm)	69,7633	-0,0866	-0,1240
Lebar (53,34 mm)	53,2933	-0,0466	-0,0874

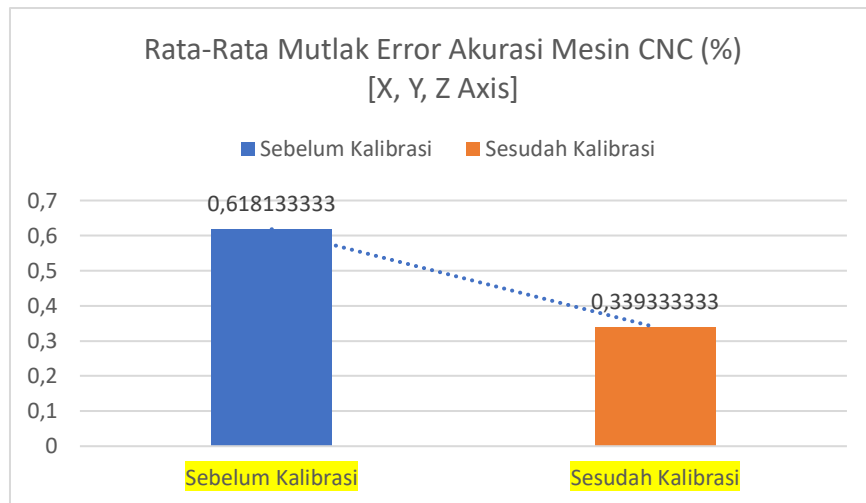
5.4.5. Analisa dan Grafik Visualisasi Hasil Pengujian Akurasi Pergerekan Sumbu CNC serta Jalur PCB

1. Akurasi Pergerakan Sumbu CNC

Pengujian akurasi dilakukan dengan memberi perintah gerakan pada sumbu X, Y, dan Z sejauh 1 mm dan 10 mm, kemudian dibandingkan hasil pergerakan aktual yang diukur menggunakan jangka sorong digital.

- a. Sumbu X: Pada pengujian sebelum kalibrasi, sumbu X menunjukkan deviasi rata-rata sebesar 0,0156 mm dengan error -0,2363%. Hal ini mengindikasikan bahwa pergerakan aktual mesin sedikit lebih kecil dibandingkan target. Setelah dilakukan kalibrasi dengan menyesuaikan nilai travel resolution dari 80 langkah/mm menjadi 80,1895 langkah/mm, hasil pengujian menunjukkan adanya perubahan. Rata-rata deviasi menjadi 0,0254 mm dengan error 0,2545%. Artinya, sumbu X cenderung bergerak sedikit lebih panjang dari target perintah. Selisih rata-rata error sebelum dan sesudah kalibrasi adalah -0,4908%, yang menunjukkan adanya perbaikan dalam kesesuaian gerakan aktual terhadap target meskipun terdapat sedikit kecenderungan overshoot.
- b. Sumbu Y: Pada pengujian awal, sumbu Y memiliki deviasi rata-rata -0,1414 mm dengan error -1,3818%, yang berarti hasil pergerakan aktual lebih pendek dari target. Setelah dilakukan kalibrasi dengan mengubah travel resolution dari 80 langkah/mm menjadi 81,1209 langkah/mm, nilai rata-rata deviasi berubah menjadi -0,0292 mm dengan error -0,3090%. Hal ini memperlihatkan adanya perbaikan signifikan terhadap akurasi gerakan, karena error menurun lebih dari satu persen. Selisih rata-rata error adalah -1,0728%, sehingga kalibrasi pada sumbu Y dapat dikatakan efektif dalam meningkatkan ketepatan pergerakan.
- c. Sumbu Z: Sumbu Z sebelum kalibrasi menunjukkan deviasi rata-rata 0,0254 mm dengan error 0,2363%, menandakan bahwa gerakan sedikit lebih panjang dari target. Setelah kalibrasi dengan memperbaiki nilai travel resolution dari 400 langkah/mm menjadi 400,9476 langkah/mm, pengujian menghasilkan deviasi rata-rata -0,0045 mm dengan error

0,4545%. Hal ini mengindikasikan bahwa sumbu Z masih memiliki kecenderungan overshoot meskipun deviasinya relatif kecil. Selisih rata-rata error antara sebelum dan sesudah kalibrasi tercatat -0,2182%.



Gambar 5. 5 Rata-Rata Mutlak Error Mesin CNC (%)

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Berdasarkan Gambar 5.5 bar chart di atas memperlihatkan hasil perbandingan rata-rata nilai mutlak error pergerakan sumbu mesin CNC sebelum dan sesudah dilakukan kalibrasi. Nilai rata-rata ini dihitung berdasarkan deviasi masing-masing sumbu X, Y, dan Z. Sebelum kalibrasi, rata-rata mutlak error diperoleh sebesar 0,6181%, yang berasal dari nilai error sumbu X = 0,2363%, Y = 1,3818%, dan Z = 0,2363%. Setelah dilakukan proses kalibrasi travel resolution pada ketiga sumbu, rata-rata mutlak error menurun menjadi 0,3393%, dengan komposisi error sumbu X = 0,2545%, Y = 0,3090%, dan Z = 0,4545%.

Penurunan rata-rata error sebesar 0,2788% ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi mampu meningkatkan presisi pergerakan mesin CNC, sehingga kesesuaian gerakan aktual terhadap perintah semakin baik dan dapat mendukung ketelitian pada proses pencetakan jalur PCB.

2. Desain PCB PTH (Plated Through Hole)

Pengujian pada desain PCB PTH dilakukan sebanyak tiga kali percobaan untuk mengevaluasi akurasi hasil grafir mesin CNC terhadap ukuran desain yang telah ditentukan. Fokus pengukuran meliputi lebar jalur pada titik a, b, dan c, serta dimensi panjang dan lebar papan.

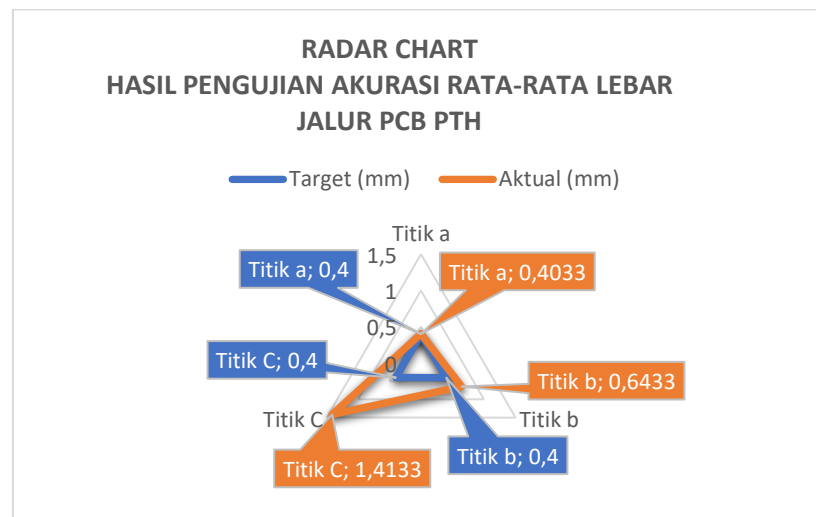
Hasil pengujian menunjukkan bahwa jalur titik a relatif mendekati target. Dari ketiga percobaan, rata-rata lebar aktual adalah 0,4033 mm dengan deviasi 0,0033 mm dan error hanya sekitar 0,83%, sehingga dapat dikatakan jalur titik a cukup akurat.

Sebaliknya, pada jalur titik b, meskipun target lebar jalur adalah 0,4 mm, hasil pengujian rata-rata menunjukkan nilai 0,6433 mm dengan deviasi 0,2433 mm dan error 60,8333%. Hal ini menunjukkan adanya pelebaran jalur yang cukup signifikan.

Kesalahan yang paling besar terjadi pada jalur titik c, di mana target hanya 0,4 mm, namun rata-rata hasil aktual mencapai 1,4133 mm dengan deviasi 1,0133 mm dan error sangat tinggi yaitu 253,33%.

Untuk dimensi papan, hasil pengukuran menunjukkan tingkat akurasi yang baik. Pada bagian panjang, nilai target adalah 82,55 mm, dan hasil rata-rata aktual 82,5666 mm dengan deviasi 0,0166 mm serta error sangat kecil yaitu 0,0201%. Sementara pada bagian lebar, target 31,75 mm, hasil aktual rata-rata 31,59 mm dengan deviasi -0,16 mm dan error -0,5039%.

Dari sisi konektivitas jalur, seluruh percobaan menunjukkan hasil “*Terhubung Semua*”, artinya meskipun terjadi perbedaan lebar jalur, fungsi dasar konektivitas antar titik pada PCB tetap tercapai.



Gambar 5. 6 Radar Chart Hasil Pengujian Akurasi Rata-Rata Lebar jalur PCB PTH

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Berdasarkan *Gambar 5.6* Radar Chart tersebut terlihat adanya perbandingan yang jelas antara nilai target desain (0,4 mm) dengan hasil aktual pada titik pengukuran a, b, dan c.

Pada titik a, hasil aktual rata-rata sebesar 0,4033 mm, yang sangat mendekati nilai target 0,4 mm. Hal ini menunjukkan tingkat akurasi yang cukup baik.

Pada titik b, lebar jalur aktual rata-rata meningkat menjadi 0,6433 mm, atau lebih besar dibanding target. Kondisi ini tetap mengindikasikan adanya pelebaran jalur akibat ketidakstabilan pergerakan mesin.

Sedangkan pada titik c, terjadi penyimpangan yang paling signifikan. Nilai aktual rata-rata mencapai 1,4133 mm, jauh di atas target 0,4 mm. Grafik radar memperlihatkan perbedaan yang sangat besar di titik ini, menandakan adanya kesalahan akurasi yang tinggi pada jalur hasil grafir.

Secara keseluruhan, radar chart ini menggambarkan bahwa meskipun mesin CNC mampu menghasilkan jalur dengan dimensi mendekati target pada titik tertentu (seperti titik a), namun masih terdapat penyimpangan cukup besar pada jalur lain (titik b dan terutama titik c). Hal ini dapat disebabkan oleh ketidakakuratan pergerakan sumbu X dan Y, serta

keterbatasan sistem transmisi berbasis timing belt yang memiliki sifat elastis dan dapat mengalami regangan atau slip. Faktor-faktor ini berkontribusi pada pelebaran jalur, terutama pada titik b dan c, sehingga presisi mesin masih perlu ditingkatkan meskipun secara fungsional PCB tetap bekerja.

3. Desain PCB SMD (Surface Mount Device)

Pengujian desain PCB SMD dilakukan sebanyak tiga kali percobaan untuk mengevaluasi akurasi mesin CNC dalam menghasilkan jalur grafir berukuran kecil sesuai desain. Fokus pengujian dilakukan pada lebar jalur di titik a, b, dan c, serta dimensi panjang dan lebar papan.

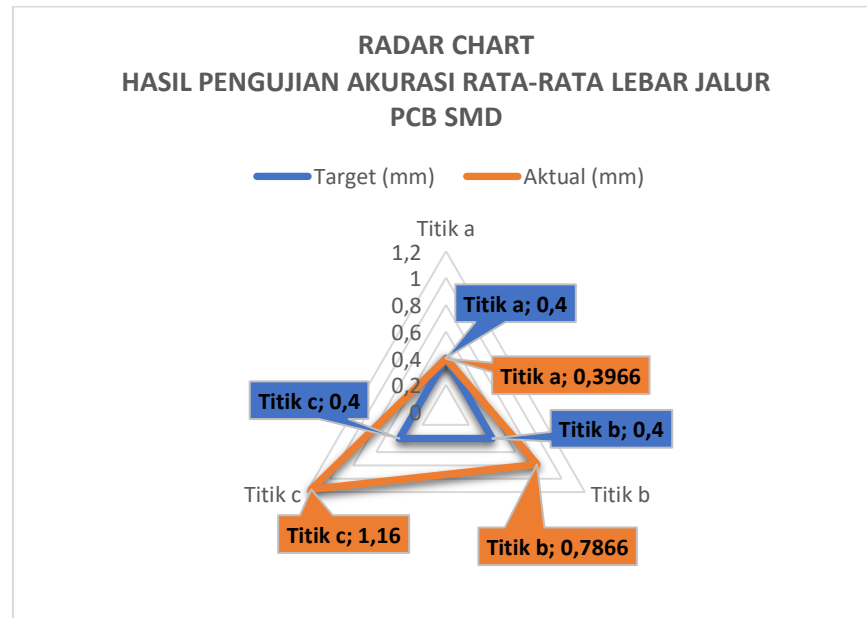
Hasil pengujian menunjukkan bahwa jalur titik a memiliki tingkat akurasi paling baik. Rata-rata hasil aktual adalah 0,3966 mm dari target 0,4 mm, dengan deviasi -0,0033 mm dan error sangat kecil yaitu -0,83%. Hal ini menandakan bahwa pada jalur dengan ukuran kecil, mesin CNC masih mampu menghasilkan hasil grafir yang mendekati spesifikasi desain.

Pada jalur titik b, hasil aktual rata-rata meningkat menjadi 0,7866 mm, lebih lebar dari target 0,4 mm dengan deviasi 0,3866 mm dan error 96,66%. Penyimpangan ini cukup signifikan dan menunjukkan adanya pelebaran jalur akibat keterbatasan presisi mesin, khususnya pada pengendalian pergerakan sumbu X-Y.

Kesalahan yang paling besar terjadi pada jalur titik c, dengan target 0,4 mm, namun rata-rata hasil aktual mencapai 1,16 mm. Nilai ini menunjukkan deviasi 0,76 mm dan error yang sangat tinggi yaitu 190%, sehingga lebar jalur jauh melebihi ukuran desain. Hal ini dapat dipengaruhi oleh faktor mekanis mesin, seperti kelonggaran pada timing belt atau akumulasi error pada pergerakan sumbu CNC.

Untuk dimensi papan, hasil pengukuran masih cukup baik. Panjang papan dengan target 64,77 mm diperoleh rata-rata aktual 64,81 mm dengan deviasi 0,04 mm dan error sangat kecil yaitu 0,0617%. Sedangkan pada lebar papan dengan target 25,4 mm, diperoleh rata-rata aktual 25,2566 mm dengan deviasi -0,1433 mm dan error -0,5643%, yang masih tergolong cukup akurat.

Dari sisi konektivitas, ketiga percobaan menunjukkan hasil “*Terhubung Semua*”, artinya meskipun terjadi pelebaran jalur cukup besar pada titik tertentu, fungsi dasar PCB tetap tercapai karena semua jalur tetap saling terhubung termasuk untuk komponen IC SMD tipe SOIC (*Small Outline Integrated Circuit*) pada desain PCB SMD.



Gambar 5. 7 Radar Chart Hasil Pengujian Akurasi Rata-Rata Lebar jalur PCB SMD

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Berdasarkan Gambar 5.7 Radar Chart di atas, terlihat perbandingan antara nilai target (biru) dan hasil aktual (oranye) dari rata-rata lebar jalur PCB SMD pada titik a, b, dan c.

Pada titik a, hasil aktual sebesar 0,3966 mm hampir sama dengan target 0,4 mm, sehingga akurasinya sangat baik. Namun, pada titik b hasil aktual meningkat menjadi 0,7866 mm, lebih lebar dibanding target 0,4 mm, yang menunjukkan adanya pelebaran jalur. Sementara itu, pada titik c terjadi penyimpangan paling besar, di mana hasil aktual mencapai 1,16 mm dari target 0,4 mm, sehingga terlihat perbedaan yang sangat signifikan.

Secara umum, radar chart ini memperlihatkan bahwa meskipun mesin CNC mampu menghasilkan jalur yang presisi pada ukuran kecil (titik a),

namun masih terdapat ketidakakuratan yang cukup besar pada jalur yang lebih panjang (titik b dan c).

4. Desain PCB Gabungan (PTH & SMD)

Pengujian pada desain PCB Gabungan dilakukan sebanyak tiga kali percobaan untuk mengevaluasi akurasi hasil grafir mesin CNC terhadap jalur dengan variasi lebar berbeda (0,4 mm hingga 6,4 mm) seperti pada *Gambar 2.40*. Parameter yang diamati meliputi lebar jalur pada titik a sampai i, serta dimensi panjang dan lebar papan.

Berdasarkan hasil rata-rata dari ketiga percobaan, diperoleh beberapa temuan sebagai berikut :

a. Jalur Titik a (0,4 mm)

Rata-rata lebar aktual adalah 0,3433 mm dengan deviasi -0,0566 mm dan error -14,16%. Hal ini menunjukkan jalur cenderung lebih sempit dari desain aslinya.

b. Jalur Titik b (0,5 mm)

Hasil rata-rata lebar aktual adalah 0,4666 mm dengan deviasi -0,0333 mm dan error -6,67%. Penyempitan masih terjadi, namun lebih kecil dibanding titik a.

c. Jalur Titik c (0,8 mm)

Nilai rata-rata lebar aktual adalah 0,8066 mm, sangat mendekati target dengan deviasi 0,0066 mm dan error hanya 0,83%. Titik ini menunjukkan hasil paling akurat.

d. Jalur Titik d (1,6 mm)

Hasil pengukuran menunjukkan lebar aktual rata-rata 1,61 mm dengan deviasi 0,01 mm dan error 0,63%, juga tergolong sangat akurat.

e. Jalur Titik e (2,5 mm)

Nilai rata-rata aktual adalah 2,4 mm, deviasi -0,1 mm, dan error -4%. Terjadi sedikit penyempitan jalur.

f. Jalur Titik f (3,2 mm)

Rata-rata aktual 3,0933 mm dengan deviasi -0,1066 mm dan error -3,33%, menunjukkan hasil mendekati target dengan penyempitan kecil.

g. Jalur Titik g (4 mm)

Hasil aktual rata-rata 3,94 mm dengan deviasi -0,06 mm dan error -1,5%, akurasi cukup baik.

h. Jalur Titik h (5 mm)

Rata-rata aktual 4,88 mm, deviasi -0,12 mm, dan error -2,4%, menunjukkan sedikit penyempitan jalur.

i. Jalur Titik i (6,4 mm)

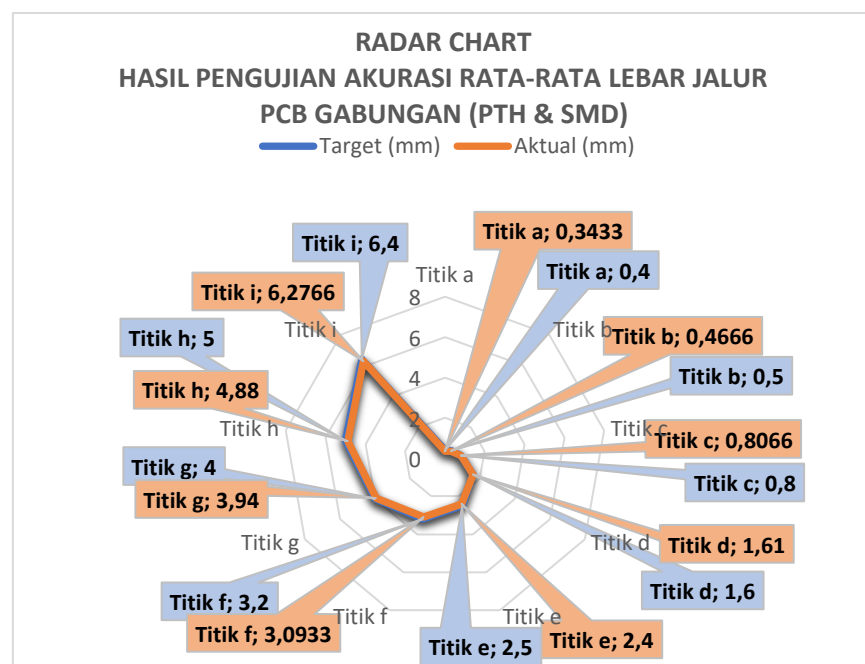
Lebar rata-rata aktual 6,2766 mm dengan deviasi -0,1233 mm dan error -1,93%, masih dalam batas akurasi yang dapat diterima.

• Dimensi Panjang dan Lebar PCB

Panjang papan : target 69,85 mm, rata-rata aktual 69,7633 mm, deviasi -0,0866 mm, error -0,124%.

Lebar papan : target 53,34 mm, rata-rata aktual 53,2933 mm, deviasi -0,0466 mm, error -0,087%.

Kedua dimensi ini menunjukkan akurasi yang sangat baik dengan error di bawah 0,2%.



Gambar 5. 8 Radar Chart Hasil Pengujian Akurasi Rata-Rata Lebar jalur PCB

Gabungan

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2025)

Berdasarkan *Gambar 5.8* Radar Chart di atas, terlihat perbandingan antara nilai target (garis biru) dengan hasil aktual rata-rata (garis oranye) dari pengujian lebar jalur PCB Gabungan pada titik a hingga i.

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa:

Jalur dengan lebar kecil (0,4–0,5 mm) yaitu titik a dan b mengalami penyempitan cukup besar dibandingkan target. Titik a hanya mencapai 0,3433 mm dari target 0,4 mm, dan titik b sebesar 0,4666 mm dari target 0,5 mm.

Jalur dengan lebar sedang (0,8–1,6 mm), yakni titik c dan d, hasilnya lebih akurat. Titik c tercapai 0,8066 mm dari target 0,8 mm (hampir tepat), sementara titik d tercatat 1,61 mm dari target 1,6 mm.

Jalur dengan lebar menengah (2,5–5 mm), yaitu titik e hingga h, cenderung stabil meskipun ada sedikit penyempitan. Misalnya, titik e hasilnya 2,4 mm dari target 2,5 mm, titik g 3,94 mm dari target 4 mm, dan titik h 4,88 mm dari target 5 mm.

Jalur dengan lebar besar (6,4 mm) pada titik i menunjukkan nilai aktual 6,2766 mm, sedikit lebih kecil dari target dengan selisih sekitar -1,93%.

Secara visual, grafik memperlihatkan bahwa perbedaan antara target dan hasil aktual semakin mengecil pada jalur dengan lebar lebih besar, sedangkan pada jalur berukuran sangat kecil deviasi lebih signifikan.

Hal ini menunjukkan bahwa mesin CNC lebih stabil dan akurat saat melakukan grafir pada jalur lebar menengah hingga besar (2,5 – 6,4mm), sementara pada jalur sangat kecil (0,4–0,5 mm) masih terdapat keterbatasan akurasi akibat faktor mekanis, seperti penggunaan timing belt pada sumbu XY dan toleransi pergerakan stepper motor. Sehingga bentuk desain jalur pcb juga mempengaruhi.

Dalam pengujian ini, pembuatan dan penggunaan komponen pada hardware CNC sangat mempengaruhi hasil. Faktor mekanis seperti sistem penggerak timing belt, leadscrew, serta material body CNC berpengaruh terhadap tingkat akurasi. Selain itu, parameter pemrograman pada FlatCAM seperti Cut Z, overlap, dan jenis tool (*tool type*) yang digunakan juga memberikan pengaruh signifikan. Perubahan

pada nilai travel resolution sumbu XYZ turut memengaruhi hasil grafir, sehingga harus diimbangi dengan penyesuaian parameter FlatCAM yang tepat.