Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi dan Teknologi
Vol 11 No. 1, April 2025
P-ISSN : 2477-5029
E-ISSN : 2502-0498

Rancang Bangun Mesin CNC Laser *Engraving* Berbasis Arduino untuk Edukasi Teknologi CNC

Bukhari Kasim*[1], Usman[2], Sumardi[3], Muhammad Razi[4], Edi Saputra[5], Amalia Harmin[6]
[1,2,3]Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe; Lhokseumawe, Indonesia
[4]Jurusan Teknik Mesin UNSAM; Langsa, Indonesia
e-mail: *[1] bukhari@pln.ac.id, [2] usman@pln.ac.id, [3] sumardi_pnl@pln.ac.id, [4]razi.pnl@pnl.ac.id
[5]edi.saputra@pnl.ac.id, [6]amaliaharmin@unsam.ac.id

Abstrak

Mesin laser engraving CNC merupakan suatu alat yang dapat digunakan untuk memotong dan mengukir berbagai jenis material dengan tingkat presisi yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun mesin laser engraving CNC sebagai media pembelajaran bagi mahasiswa Jurusan Teknik Mesin. Proses perancangan meliputi pemilihan komponen, pembuatan rangka, dan integrasi sistem kendali berbasis Arduino controller dan software GRBL. Mesin ini dirancang untuk digunakan dalam kegiatan demonstrasi dan praktikum terkait prinsip kerja mesin CNC, pemrograman, dan pengoperasian sistem kendali numerik pada mesin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gerak sumbu x, y, z sebelum dikalibrasi memiliki error sebesar 80,6%, 78,2%, 76,3% dan setelah dikalibrasi sebesar 0,2%, 2,3%, 0,3% untuk setiap sumbu secara berurutan. Nilai error ini turun menjadi 0,2%, 2,3% dan 0,3% setelah proses kalibrasi sumbu x, y, dan z. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mesin laser engraving CNC yang dibangun dapat berfungsi dengan baik, menghasilkan ukiran dan pemotongan yang presisi sesuai dengan spesifikasi yang diberikan. Penggunaan mesin ini sebagai media pembelajaran diharapkan dapat meningkatkan pemahaman mahasiswa di bidang manufaktur modern dan teknologi CNC, serta memperkuat keterampilan teknisnya.

Kata kunci*— Manufaktur modern, Kontrol numerik, Laser gravir, Arduino, GRBL*

Abstract

CNC laser engraving machine is a device that can be used to cut and engrave various types of materials with high precision. This study aims to design and build a CNC laser engraving machine as a learning medium for students of the Mechanical Engineering Department. The design process includes component selection, frame manufacturing, and integration of a control system based on the Arduino controller and GRBL software. This machine is designed to be used for demonstrations and practicums related to the working principles of CNC machines, programming, and operation of the numerical control system on the machine. The results of the study showed that the motion of the x, y, z axes before calibration had an error of 80.6%, 78.2%, 76.3%. This error value decreased to 0.2%, 2.3% and 0.3% after the x, y and z axis calibration process. These results indicate that the CNC laser engraving machine that was built can function well, producing precise carvings and cuts according to the given specifications. The use of this machine as a learning medium is expected to improve students' understanding in the field of modern manufacturing and CNC technology, as well as strengthen their technical skills.

Keywords—*Modern manufacturing, Numerical Control, Laser Enggraving, Arduino, GRBL*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi otomasi berbasis komputer pada mesin perkakas telah menghasilkan mesin perkakas yang mampu menangani berbagai pekerjaan yang rumit dalam jangka waktu kerja yang singkat[1]. Penggunaan mesin perkakas untuk menangani pekerjaan seperti pembubutan, frais/milling telah menghasilkan berbagai produk yang memiliki tingkat ketelitian yang tinggi[2],[3]. Lahirnya mesin CNC (Computer Numerical Control) merupakan pembaruan dari mesin perkakas yang telah ada sebelumnya yang kurang efektif dari segi waktu dan biaya. Pada dasarnya mesin CNC adalah salah satu sistem otomatisasi yang dikendalikan oleh computer dengan menggunakan bahasa numerik untuk bergerak sesuai pola desain dan sistem mekanik mesin CNC untuk pengerjaan grafir PCB, terdiri dari komponen-komponen utama seperti rangka, sistem panel kontrol X-axis, Y-axis, dan Z-axis. Konsep CNC yang akan dikembangkan pada penelitian ini merupakan lanjutan dari tinjauan lapangan untuk mengembangkan mesin CNC sehingga penerapannya menjadi lebih mudah.

Inovasi teknologi permesinan CNC atau Computer Numerical Control memungkinkan untuk membuat objek-objek yang rumit dengan mudah. Banyak perusahaan menggunakan mesin CNC untuk memenuhi keperluan produksi massal maupun untuk membuat suku cadang khusus untuk bidang tertentu[4]. Pengoperasian mesin CNC ini sangatlah sederhana tetapi punya kemampuan untuk memproduksi produk dalam scala besar dan dapat memproduksi beberapa komponen secara masal. Pengerjaan yang detail dan rumit dapat dilakukan secara otomatis menggunakan CNC secara mudah dan dalam kuantitas yang banyak dan hasil yang sama persis secara efisien.

Saat ini, mesin CNC menjadi bagian penting dalam perkembangan teknologi pemesinan modern. Peralatan mesin konvensional yang menggantungkan hasil produk permesinan pada operator yang terampil, akan ditinggalkan di masa yang akan datang, karena variasi dimensi dalam pembuatan produk dengan menggunakan mesin konvensional sulit dikendalikan yang bisa menyebabkan terjadinya kesalah dalam proses pembuatan produk. Dengan mesin CNC variasi dimensi dapat diperkecil atau dihapus, sehingga produk cacat dapat dieliminasi. Sistem produksi tanpa cacat (zero defect) hanya bisa diimplementasikan jika semua fungsi mesin dapat dikendalikan secara teliti (accurate) dan tepat (precise), dan ini hanya dimungkinkan jika sistem permesinan dikendalikan melalui komputer, seperti pada mesin-mesin CNC[5].

Beberapa komponen memerlukan tingkat kehalusan permukaan yang tinggi untuk mencegah terjadinya gesekan antar komponen, misalnya pada komponen mekanik elemen mesin memerlukan kehalusan yang tinggi untuk mencegah terjadinya gesekan antar komponen mesin, hal ini sangat penting karena akan mempengaruhi kinerja mesin. Permesinan[6].

Mesin ukiran CNC telah banyak digunakan dalam industri kreatif dan manufaktur untuk menghasilkan produk dengan detail yang rumit dan tingkat presisi yang tinggi[7]. Namun pemanfaatannya dalam dunia pendidikan khususnya sebagai media pembelajaran masih terbatas. Padahal, pemahaman prinsip kerja mesin CNC merupakan aspek penting dalam bidang teknik mesin, mekatronik, dan teknik manufaktur. Penggunaan mesin ukiran CNC sebagai media pembelajaran diharapkan dapat mengenalkan mahasiswa pada teknologi manufaktur modern sekaligus meningkatkan keterampilan praktisnya[8].

Mesin CNC GRBL adalah jenis mesin CNC (Computer Numerical Control) yang dikendalikan oleh firmware open-source bernama GRBL. CNC sendiri adalah teknologi yang digunakan untuk mengotomatisasi kontrol pergerakan alat potong atau pengerjaan material berdasarkan instruksi digital yang diprogram melalui komputer. GRBL, sebagai firmware, berfungsi sebagai otak dari mesin CNC, menerjemahkan perintah G-code menjadi sinyal yang menggerakkan motor stepper untuk melakukan pekerjaan yang diinginkan dengan presisi tinggi. Mesin CNC berbasis GRBL menawarkan fleksibilitas dan efisiensi biaya yang tinggi, menjadikannya pilihan ideal bagi berbagai jenis usaha, mulai dari kerajinan tangan hingga

industri kecil. Keunggulan utama GRBL sebagai firmware open-source memungkinkan penyesuaian dan pengembangan yang luas, memungkinkan usaha-usaha ini untuk berinovasi dan memenuhi kebutuhan pasar yang beragam. Dengan dukungan komunitas yang besar dan sumber daya yang melimpah, penggunaan mesin CNC GRBL terus berkembang dan membuka peluang baru bagi para pengusaha dan kreator di berbagai sektor[9].

Saat ini, tantangan yang dihadapi dalam dunia pendidikan adalah bagaimana menyediakan fasilitas pembelajaran yang relevan dengan perkembangan teknologi industri, namun tetap ekonomis dan mudah dioperasikan oleh pemula. Banyak institusi pendidikan yang belum memiliki akses terhadap peralatan CNC karena biaya yang relatif tinggi dan kompleksitas operasional mesin-mesin tersebut.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun mesin CNC grafir yang tidak hanya terjangkau, tetapi juga dirancang khusus sebagai media pembelajaran. Mesin ini diharapkan memiliki desain yang sederhana namun fungsional, sehingga dapat dioperasikan dengan mudah oleh siswa maupun pengajar. Selain itu, mesin ini juga diharapkan menjadi alat bantu yang efektif dalam mengajarkan konsep-konsep dasar seperti koordinat sumbu, pengendalian numerik, dan aplikasi pemrograman CNC.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan metodelogi riset:

2.1 Studi literatur

Pada tahapan ini dilakukan penelusuran referensi dari penelitian-penelitian sebelumnya terkait mesin CNC, teknologi laser, dan software CNC. Studi literatur ini berguna untuk memahami desain terbaik, komponen utama, dan tantangan teknis.

2.2 Perancangan sistem

Tahapan ini meliputi desain mekanik, pemilihan komponen elektronik dan perancangan software. Pada tahap desain mekanik, kerangka mesin dirancang menggunakan software CAD. Bagian ini mencakup pemilihan material, sistem transmisi gerak (screw drive atau belt), dan komponen elektronik (motor stepper, driver motor). Selanjutnya pada tahap pemilihan komponen elektronik dilakukan pemilihan komponen seperti microcontroller, driver motor, modul laser, dan driver laser. Sedangkan pada tahapan perancangan software dilakukan pemilihan software pengendali CNC, bagian ini juga mencakup pengaturan parameter untuk laser engraving.

2.3 Proses Produksi

Tahapan proses produksi adalah tahapan dimana dilakukan proses pembuatan semua komponen dari mesin CNC dan selanjutnya dilakukan perakitan semua komponen mekanik dan elektronik berdasarkan desain yang telah dibuat. Proses ini dilakukan secara bertahap dan diuji setiap tahapannya untuk memastikan bahwa komponen bekerja dengan baik.

2.3 Pengujian dan Kalibrasi

Pengujian dan Kalibrasi; pada langkah ini dilakukan uji performa mesin dengan berbagai jenis material (kayu, akrilik, kulit, dll.) dan variasi pola gravir. Parameter yang diuji meliputi kecepatan, akurasi pemotongan, dan kualitas hasil gravir. Pada tahap ini juga dilakukan proses kalibrasi untuk menyesuaikan setting motor, kecepatan gerak, dan kekuatan laser untuk mendapatkan hasil gravir terbaik.

Untuk mengetahui nilai akurasi dan repeatibility mesin maka dilakukan perhitungan rata-rata nilai error posisi dan standar deviasi dengan persamaan 1 dan persamaan 2.

$$\bar{e} = \frac{\sum e}{N} \quad (1)$$

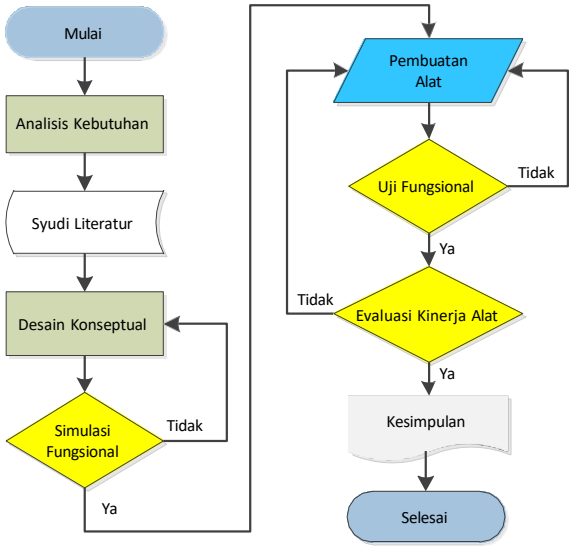
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(e_i - \bar{e})^2} \quad (2)$$

di mana:

- N adalah jumlah pengukuran
- ei adalah nilai error data ke-i
- $\bar{e}$ adalah rata-rata error
- σ adalah standar deviasi

2.3 Analisa data hasil pengujian

Pada tahap ini hasil gravir dianalisis dari segi keakuratan, ketahanan mesin, dan kualitas gravir. Hasil analisis akan digunakan untuk memperbaiki desain jika diperlukan. Secara keseluruhan tahapan penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

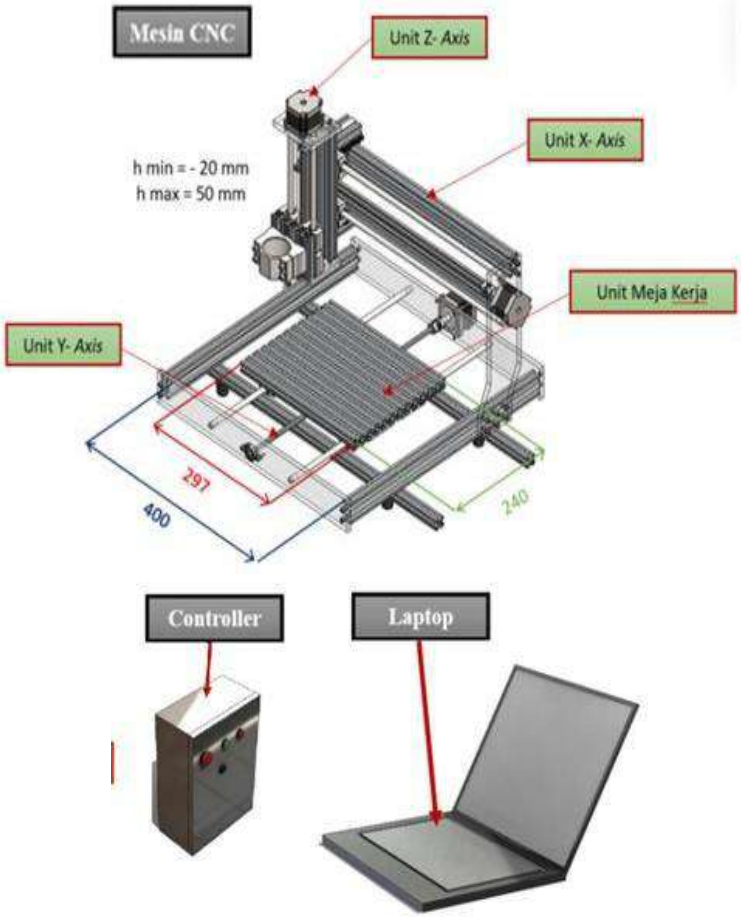
Pada bagian ini, akan dibahas secara rinci mengenai proses perancangan dan pembuatan mesin CNC laser grafir. Pembahasan mencakup pemilihan komponen, perakitan mekanik, integrasi sistem kendali, hingga pengujian kinerja mesin.

3.1. Perancangan Sistem

Pada penelitian ini, mesin CNC yang dirancang diperlihatkan pada Gambar 2. Mesin ini terdiri atas 3 (tiga) unit utama, yaitu: Mesin CNC yang dilengkapi rangka mesin dengan 3 unit motor penggerak, micro-controller dan laptop atau PC. Mesin CNC ini dapat bergerak dalam 3-Axis (X, Y dan Z).

Secara umum kontruksi mekanik mesin CNC yang akan dibuat dalam penelitian ini terdiri kontruksi rangka yang direncanakan terbuat dari aluminium V-Slot dan akrilik, meja mesin menggunakan aluminium V-Slot, pencekam benda kerja, pengarah gerak menggunakan linear lead screw, motor pergerak berupa yang terdiri dari 3 unit motor servo, sebuah modul laser sebagai tool untuk menggrafir benda kerja dan komponen pendukung lainnya. Kontroler mesin

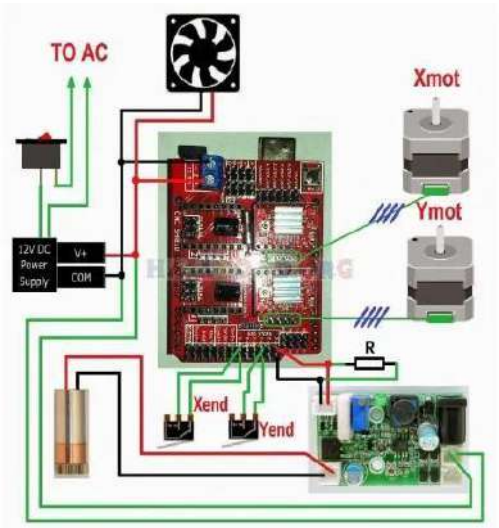
akan menggunakan jenis Arduino dan GRBL lases serta laptop atau PC sebagai media untuk memberikan input gambar kerja untuk proses grafir.



Gambar 2 Rancangan Kontruksi Mekanik Mesin CNC Engraving

Agar seluruh komponen dalam sistem mesin CNC ini dapat bekerja untuk mencapai suatu output sesuai dengan yang diharapkan, maka kontruksi fisik dari sistem perlu diintegrasikan sedemikian rupa dengan kontruksi sistem elektronik. Dalam hal ini keseluruhan sistem elektronik yang dipakai dalam sistem dihubungkan dalam suatu skematik rangkaian seperti yang yang diperlihatkan pada Gambar 3.

Mesin CNC grafir ini dirancang dengan dimensi: Panjang total 574 mm, Lebar total 630 mm dan Tinggi total 473 mm untuk area kerja seluas 400 mm x 240 mm. Mesin CNC ini menggunakan linear lead screw sebagai pengarah gerak untuk setiap sumbunya. Unit penggerak sumbu-Z dirancang untuk dapat mengerakkan modul laser mendekati atau menjauhi benda kerja untuk keperluan penetrasi pemakanan yang berbeda pada proses pembuatan kontur. Sedangkan unit penggerak sumbu-X dan sumbu-Y dirancang agar dapat menggerakkan modul laser dalam arah sumbu-X sejauh 400mm dan dalam arah sumbu-Y sejauh 240mm.



Gambar 3. Skematik rangkaian elektronik mesin CNC

Dalam penelitian ini, Arduino digunakan untuk mengendalikan beberapa fungsi berikut:

- Pengendalian motor: digunakan untuk mengendalikan motor yang menggerakkan meja dan modul laser pada mesin laser grafir. Arduino dapat memastikan bahwa motor bergerak dengan presisi berdasarkan algoritma yang sudah diprogramkan.
- Pengendalian kecepatan dan intensitas laser: digunakan untuk mengontrol kecepatan gerak dan intensitas laser saat melakukan pemotongan atau grafir. Ini memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan parameter pemotongan sesuai dengan bahan yang sedang diproses.
- Antarmuka pengguna: digunakan untuk membuat antarmuka pengguna sederhana seperti layar LCD atau panel kontrol yang memungkinkan pengguna untuk mengatur dan mengontrol proses pemotongan atau grafir.

Arduino memainkan peran sentral dalam pengoperasian mesin CNC laser yang menggunakan GRBL sebagai firmware pengontrolnya. Arduino menjalankan firmware GRBL, yang bertanggung jawab untuk mengontrol gerakan motor stepper atau servo yang menggerakkan sumbu mesin CNC pada mesin CNC laser. GRBL menerima perintah G-code dari perangkat lunak komputer dan menerjemahkannya menjadi sinyal listrik yang tepat untuk menggerakkan motor sesuai instruksi tersebut. Ini memastikan bahwa gerakan laser akurat dan sesuai dengan desain yang diinginkan. Arduino yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis Arduino Uno dengan chipset Atmega 328P DIP. Arduino ini memiliki memori flash 32 KB, dengan SRAM 2 KB dan clock speed 16 MHz. Ini memiliki 14 pin input/output digital dengan 6 pin analog dan 6 pulsa dengan pin modulasi (PWM). Arduino ini akan bekerja untuk tegangan input antara 7 hingga 12 volt[10].

Disamping arduino, mesin CNC laser grafir ini juga memerlukan software pendukung lain yaitu GRBL yang merupakan perangkat lunak open source yang mulai banyak digunakan untuk mengendalikan gerak mesin CNC. GRBL dirancang khusus untuk mengendalikan pergerakan motor stepper dan servo, yang mengontrol pergerakan alat potong atau pencetakan laser pada mesin CNC. Cara kerja mesin laser engraving menggunakan sistem kontrol sirkuit yang berfungsi sebagai pusat pengendali mesin. Mikrokontroler menerima data digital dari komputer melalui komunikasi serial. Mikrokontroler kemudian membaca data yang diterima

dari komputer, yang berisi instruksi untuk saklar elektronik laser, dan menghasilkan logika untuk mengendalikan driver motor stepper. Data yang diteruskan ke driver motor stepper ini kemudian digunakan untuk menggerakkan motor stepper tersebut[11].

Penelitian ini mengggunakan software Laser GRBL v7.12.0 Pemakaian GRBL dalam mesin CNC ini memiliki fungsi untuk:

- Interpretasi G-Code: GRBL menerima perintah gerakan dalam format G-Code. G-Code adalah bahasa pemrograman standar yang digunakan untuk mengontrol mesin CNC. Setiap baris G-Code berisi instruksi spesifik untuk pergerakan motor, kecepatan, dan fungsi lainnya.
- Pengaturan Parameter: Pengguna dapat mengatur parameter GRBL melalui antarmuka serial atau USB. Parameter-parameter ini mencakup langkah per milimeter, kecepatan maksimum, percepatan, dan pengaturan lain yang sesuai dengan spesifikasi mesin dan kebutuhan produksi.
- Komunikasi Serial: GRBL berkomunikasi dengan komputer pengontrol melalui koneksi serial atau USB. Komputer mengirimkan perintah G-Code ke GRBL melalui koneksi ini.
- Pengendalian Motor: GRBL menginterpretasikan setiap baris G-Code dan menghasilkan sinyal keluaran yang mengontrol motor stepper atau servo. Ini mencakup perintah untuk pergerakan sumbu X, Y, dan Z serta kecepatan pemotongan atau pencetakan laser.
- Pemantauan Sensor: GRBL dapat dilengkapi dengan sensor batas akhir dan sensor homing. Sensor-sensor ini memungkinkan mesin untuk mengidentifikasi posisi awal dan batas pergerakan, serta memungkinkan proses homing yang akurat.

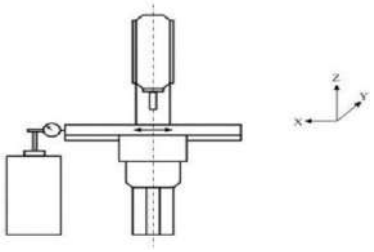
Sebagai antarmuka antara kontroler dengan komponen-komponen mesin CNC seperti motor stepper dan limit switch, digunakan sebuah CNC shield. Penggunaan CNC Shield akan memungkinkan pengendalian sejumlah motor secara bersamaan. CNC Shield juga mendukung microstepping, yang memungkinkan motor stepper bergerak dengan langkah yang lebih kecil dan presisi yang lebih tinggi. Ini dicapai dengan menggunakan jumper pada shield untuk mengatur mode microstepping pada driver motor stepper. CNC Shield juga memiliki konektor untuk limit switch atau endstop, yang bisa digunakan untuk mendeteksi batas perjalanan sumbu. Limit switch membantu mencegah kerusakan pada mesin dengan menghentikan pergerakan motor ketika batas fisik tercapai. Hal yang tidak kalah pentingnya, yaitu CNC Shield memiliki pin yang dapat digunakan untuk mengontrol spindle motor.

GRBL memiliki peran sangat penting dalam mesin CNC berbasis GRBL. Secara sederhana, GRBL berfungsi sebagai firmware yang mengendalikan seluruh operasi mesin CNC, memungkinkan mesin membaca instruksi digital (G-code) dan menerjemahkannya menjadi pergerakan mekanis pada sumbu-sumbu CNC. Pengaturan parameter GRBL adalah langkah penting untuk memastikan mesin CNC Anda beroperasi dengan presisi dan efisiensi yang optimal. Parameter ini mengatur berbagai aspek seperti langkah per milimeter (steps/mm), kecepatan maksimum, akselerasi, dan batas perjalanan pada tiap sumbu mesin CNC seperti diperlihatkan pada gambar 4.

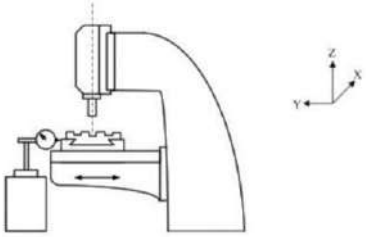
Gambar 4. Konfigurasi parameter GRBL

3.1. Pengujian dan Kalibrasi

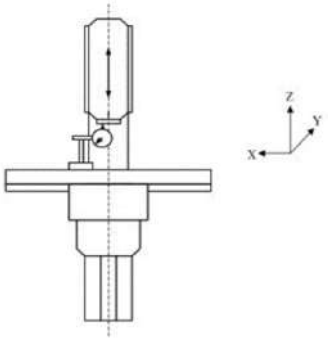
Setelah dilakukan perakitan dari semua komponen mesin CNC Laser Grafir, selanjutnya dilakukan uji kinerja mesin. Uji kinerja dilakukan untuk melihat keakuraratan dari pergerakan setiap sumbu mesin. Skema pengambilan data nilai aktual pada saat proses kalibrasi terbagi menjadi tiga, yaitu gerak sumbu-X, gerak sumbu-Y dan gerak sumbu-Z dengan kode pemrograman G00. Adapun skema tersebut dilakukan seperti ditunjukkan pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 5. Skema pengujian proses kalibrasi sumbu-X



Gambar 6. Skema pengujian proses kalibrasi sumbu-Y



Gambar 7. Skema pengujian proses kalibrasi sumbu-Z

Tahap pertama pengujian dilakukan dengan memakai nilai default setting parameter Software GRBL. Secara default nilai step per unit dari kontroler GRBL untuk sumbu-X, sumbu-Y dan sumbu-Z adalah bernilai 800 step/unit. Pengujian akurasi gerak dari masing-masing sumbu mesin dilakukan dengan 10 kali pergerakan dengan dimensi yang berbeda-beda seperti diperlihatkan pada tabel 1 sampai tabel 3.

Tabel 1. Hasil pengujian gerak sumbu-X sebelum kalibrasi

NO	Input (mm)	Output (mm)	Error (mm)	Error (%)
1	1,0	1,8	0,8	80,0
2	2,0	3,9	1,9	95,0
3	3,0	5,4	2,4	80,0
4	4,0	7,0	3,0	75,0
5	5,0	8,5	3,5	70,0
6	10,0	18,2	8,2	82,0
7	20,0	36,4	16,4	82,0
8	30,0	54,0	24,0	80,0

NO	Input (mm)	Output (mm)	Error (mm)	Error (%)
9	40,0	72,1	32,1	80,3
10	50,0	91,0	41,0	82,0
		Rata-rata	13,33	80,6

Tabel 2. Hasil pengujian gerak sumbu-Y sebelum kalibrasi

NO	Input (mm)	Output (mm)	Error (mm)	Error (%)
1	1,0	1,6	0,6	60,0
2	2,0	3,6	1,6	80,0
3	3,0	5,4	2,4	80,0
4	4,0	7,1	3,1	77,5
5	5,0	9,1	4,1	82,0
6	10,0	18,0	8,0	80,0
7	20,0	36,2	16,2	81,0
8	30,0	54,0	24,0	80,0
9	40,0	72,2	32,2	80,5
10	50,0	90,3	40,3	80,6
		Rata-rata	13,25	78,2

Tabel 3. Hasil pengujian gerak sumbu-Z sebelum kalibrasi

NO	Input (mm)	Output (mm)	Error (mm)	Error (%)
1	1,0	1,6	0,6	60,0
2	2,0	3,7	1,7	85,0
3	3,0	5,4	2,4	80,0
4	4,0	7,2	3,2	80,0
5	5,0	9,2	4,2	84,0
6	10,0	18,1	8,1	81,0
7	20,0	36,0	16,0	80,0
8	30,0	54,1	24,1	80,3
9	40,0	72,1	32,1	80,3
10	50,0	76,3	26,3	52,6
		Rata-rata	11,87	76,3

Hasil penelitian menunjukkan bahwa gerak dari sumbu x, y, z sebelum kalibrasi memiliki error diangka 80,6 %, 78,2 %, 76,3 %. Nilai error kaurasi ini masih sangat besar sehingga belum layak untuk untuk melakukan sebuah proses pemesinan. Untuk memperbaiki hal tersebut selanjutnya dilakukan kalibrasi terhadap ketiga sumbu gerak mesin CNC.

Kalibrasi dilakukan dengan cara merubah nilai parameter resolusi gerak Sumbu-X, resolusi gerak Sumbu-Y dan resolusi gerak Sumbu-Z. Perubahan ini dilakukan dengan mengatur ulang baris perintah parameter kontrol GRBL pada posisi perintah $100, $101, dan $102. Masing-masing perintah ini berguna untuk mengatur parameter step per-unit gerak sumbu-X, sumbu-Y dan sumbu-Z. Nilai dari ketiga parameter $100, $101, dan $102 dirubah menjadi 180 step/unit. Ketiga paramater ini bernilai sama karena sama2 menggunakan motor penggerak Nema 23.

Setelah dilakukan proses kalibrasi selanjutnya dilakukan pengujian ulang untuk mengukur nilai akurasi gerak untuk ketiga sumbu mesin CNC. Proses pengujian melibatkan pengaturan koordinat titik-titik yang dipilih untuk menggerakan sumbu-X, sumbu-Y, dan sumbu-Z dengan jarak langkah 1 mm sampai dengan 120 mm seperti ditunjukkan pada tabel 4 sampai tabel 6.

Tabel 4. Hasil pengukuran gerak sumbu-X setelah kalibrasi

NO	Input (mm)	Output (mm)	Error (mm)	Error (%)
1	1,0	1,0	0,0	0,0
2	2,0	2,0	0,0	0,0
3	3,0	3,0	0,0	0,0
4	4,0	4,0	0,0	0,0
5	5,0	4,9	-0,1	-2,0
6	10,0	10,0	0,0	0,0
7	20,0	20,0	0,0	0,0
8	40,0	40,0	0,0	0,0
9	80,0	80,0	0,0	0,0
10	120,0	120,1	0,1	0,1
		Rata-rata	0,00	-0,2

Tabel 5. Hasil pengukuran gerak sumbu-Y setelah kalibrasi

NO	Input (mm)	Output (mm)	Error (mm)	Error (%)
1	1,0	1,2	0,2	20,0
2	2,0	2,0	0,0	0,0
3	3,0	3,0	0,0	0,0
4	4,0	4,0	0,0	0,0
5	5,0	5,1	0,1	2,0
6	10,0	9,9	-0,1	-1,0
7	20,0	20,1	0,1	0,5
8	40,0	40,3	0,3	0,7
9	80,0	80,3	0,3	0,4
10	120,0	120,2	0,2	0,2
		Rata-rata	0,11	2,3

Tabel 6. Hasil pengukuran gerak sumbu-Z setelah kalibrasi

NO	Input (mm)	Output (mm)	Error (mm)	Error (%)
1	1,0	1,0	0,0	0,0
2	2,0	2,0	0,0	0,0
3	3,0	3,0	0,0	0,0
4	4,0	4,0	0,0	0,0
5	5,0	5,1	0,1	2,0
6	10,0	10,0	0,0	0,0
7	20,0	20,1	0,1	0,5
8	40,0	30,1	0,1	0,3
9	80,0	40,1	0,1	0,3
10	120,0	50,1	0,1	0,2
		Rata-rata	0,05	0,3

Kinerja mesin CNC grafir menjadi lebih baik setelah proses kalilbrasi dimana nilai error posisi menurun secara signifikan Nilai persentase error gerak sumbu-X, Y, dan Z secara berturut-turut setelah kalibrasi menjadi 0,2%, 2,3% dan 0,3%. Berdasarkan data hasil pengujian gerak mesin dalam sumbu-X, sumbu-Y dan sumbu-Z, selanjutnya dilakukan perhitungan akkurasi gerak mesin untuk setiap sumbunya. Akurasi mesin dihitung berdasarkan nilai rata-rata error posisi ditambah dengan nilai standar deviasi untuk masing-masing sumbu gerak mesin. Rata-rata error posisi dan standar deviasi dihitung dengan persamaan 1 dan persamaan 2. Hasil perhitungan akurasi mesin untuk ketiga sumbu gerak didaptkan bahwa akurasi gerak sumbu-X adalah 0,00±0.047mm, sumbu-Y adalah 0,11±0.137mm dan akurasi sumbu-Z adalah 0,05±0.053mm.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap mesin CNC grafir, dapat disimpulkan beberapa hal berikut. Mesin CNC yang dirancang dapat berfungsi dengan baik untuk melakukan grafir pada berbagai media non-logam. Akurasi posisi terbaik tercapai pada gerak sumbu-X dengan nilai 0,00±0,047 mm, diikuti oleh sumbu-Z dengan nilai 0,05±0,05 mm, dan sumbu-Y dengan nilai 0,11±0,137 mm. Sumbu-X dan sumbu-Y memiliki nilai repeatability yang sama, yaitu ±0,005 mm, sedangkan nilai repeatability sumbu-Z adalah ±0,007 mm. Berdasarkan kemampuan grafir serta nilai akurasi dan repeatability yang dimiliki oleh mesin CNC ini, maka mesin ini sangat layak digunakan untuk membuat produk-produk industri kreatif.

5. SARAN

Berikut beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut dari hasil penelitian ini:

- Lakukan analisis lebih lanjut terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi akurasi dan repeatability, seperti kestabilan rangka, backlash mekanik, atau kualitas sistem kendali.
- Implementasi metode kompensasi kesalahan untuk meningkatkan akurasi gerakan pada sumbu-Y yang memiliki deviasi tertinggi.
- Bandingkan performa mesin CNC yang dirancang dengan mesin komersial sejenis dalam hal akurasi, efisiensi, dan biaya produksi.
- Lakukan analisis cost-benefit untuk menentukan nilai ekonomis mesin dalam industri kreatif. Teliti potensi aplikasi mesin CNC ini dalam berbagai sektor industri kreatif seperti pembuatan suvenir, perhiasan, atau ukiran artistik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Unit P3M Politeknik Negeri Lhokseumawe yang telah memberi dukungan financial terhadap pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Pajaziti, O. Tafilaj, E. Hasanaj, and A. Gjelaj, “Optimization of CNC Working Time Depending on the Positioning of the Tools in the Magazine,” *Machines*, vol. 12, no. 8, 2024, doi: 10.3390/machines12080512.

[2] M. Sarvas, M. Holub, T. Marek, J. Prochazka, F. Bradac, and P. Blecha, “Influence of Machine Tool Operating Conditions on the Resulting Circularity and Positioning Accuracy,” *Machines*, vol. 12, no. 5, 2024, doi: 10.3390/machines12050352.

[3] U. Aulia and M. Fuadi, “Pengaruh Kondisi Pemotongan Terhadap Gaya Potong Pada Proses Milling S45C,” vol. 10, no. 1, pp. 326–333, 2024.

[4] K. C. Yao, D. C. Chen, C. H. Pan, and C. L. Lin, “The Development Trends of Computer Numerical Control (CNC) Machine Tool Technology,” *Mathematics*, vol. 12, no. 13, 2024, doi: 10.3390/math12131923.

[5] B. Kasim, A. Yunus, and A. Harmin, “Analisis Kualitas Permukaan Benda Kerja Al-6061 Hasil Pemesinan dengan Mesin CNC Milling,” vol. 10, no. 1, 2024.

[6] K. Bukhari, Y. Azwar, I. Yusuf, Darmein, and Mawardi, “Optimization of CNC machining parameters to improve surface roughness quality of the AL6061 material using the Taguchi method,” *J u r n a l P o l i m e s i n*, vol. 21, no. 4, pp. 408–413, 2023.

[7] R. Setiawan and S. Rosyadi, “Rancang Bangun Mesin CNC 3 Axis Untuk Peningkatan Kualitas Wooden Watch di UMKM Samigaluh Kulon Progo,” no. 1, pp. 37–53, 2023.

[8] K. A. Bin abd wahid, M. Agus Shidiq, M. Fajar Sidik, G. Renggani Wilis, and I. Santoso, “Transfer Technology of Laser Engraving Machine for Vocational School in

Tegal District," *SPEKTA (Jurnal Pengabdi. Kpd. Masy. Teknol. dan Apl.*, vol. 4, no. 1, pp. 163–174, 2023, doi: 10.12928/spekta.v4i1.8059.

[9] Roswaldi Sk, J. Julsam, K. Kartika, A. Fendri, and Mulyadi Mulyadi, "Implementasi Mini CNC Router 3 Axis untuk Pembuatan Huruf dan Gambar Berbasis GRBL 3.6.1," *Proceeding Semin. Nas. Politek. Negeri Lhokseumawe*, vol. 3, no. 1, pp. A95–A102, 2019.

[10] B. Kasim *et al.*, "Performance Analysis of RFID-Based Smart Door Lock Controlled by Arduino," *J. Adv. Res. Appl. Mech.*, vol. 122, no. 1, pp. 163–174, 2024, doi: 10.37934/aram.122.1.163174.

[11] M. A. S. Mafazi Rifqi, Irfan Santosa, "Rancang Bangun Mesin Cnc Laser Grafir Untuk Pembuatan Bidang Silinder Dan Datar," vol. 8, no. 2, pp. 6–11, 2022.