

Development and Performance Evaluation of a GRBL-Based CNC Router for Non-Metallic Material Engraving

Rouhillah¹, Inzar Salfikar², M. Rifaldi

^{1,2,3} Program Studi Mekatronika Politeknik Aceh

Jl. Politeknik Aceh, Pango Raya, Banda Aceh 23119

¹rouhillah@politeknikaceh.ac.id, ²inzar@politeknikaceh.ac.id, ³muhmr07@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to design, construct, and test the performance of a GRBL-based Computer Numerical Control (CNC) router for engraving non-metallic materials, such as wood and acrylic. The research stages included mechanical design, component fabrication, assembly of mechanical and electronic systems, GRBL firmware integration, and machine accuracy testing. Standard, commercially available components were used, thereby facilitating manufacturing, maintenance, and part replacement. Testing involved comparing the dimensions of the machined output against the design programmed via G-code. The results demonstrated that the machine could produce contours matching the design with a 0% successful under the tested conditions, indicating that the X, Y, and Z-axis drive systems responded precisely to control commands. The developed CNC router has the potential to serve as an economical and effective tool for laboratory-scale practical work, research, and prototyping.

Keywords : CNC router, Contour engraving, Non-metallic materials GRBL firmware, G-code.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan menguji kinerja mesin Computer Numerical Control (CNC) Router berbasis GRBL untuk proses pengukiran pada material nonlogam, seperti kayu dan akrilik. Tahapan penelitian meliputi perancangan mekanik, fabrikasi komponen, perakitan sistem mekanik dan elektronik, integrasi firmware GRBL, serta pengujian akurasi mesin. Komponen yang digunakan merupakan komponen standar yang tersedia di pasaran sehingga memudahkan proses pembuatan, perawatan, dan penggantian komponen. Pengujian dilakukan dengan membandingkan dimensi hasil pemesinan terhadap desain yang telah diprogram menggunakan G-code. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin mampu menghasilkan kontur sesuai dengan desain dengan persentase 100% berhasil pada kondisi pengujian yang dilakukan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem penggerak sumbu X, Y, dan Z mampu merespons perintah kendali secara tepat. Mesin CNC Router yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai perangkat yang ekonomis dan efektif untuk kegiatan praktikum, penelitian, serta pembuatan prototipe skala laboratorium

Kata kunci : Akurasi, CNC Router, GRBL, G-code , Nonlogam, Pemesinan,.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur telah mendorong penerapan sistem pemesinan yang lebih presisi, efisien, dan otomatis. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah Computer Numerical Control (CNC), yaitu sistem pemesinan yang mengendalikan pergerakan mesin melalui instruksi numerik (G-code). Perkembangan teknologi CNC juga didukung oleh integrasi sistem kontrol cerdas dan teknologi digital untuk meningkatkan produktivitas, kualitas produk, serta efisiensi proses manufaktur [1].

Pada industri pengolahan kayu, khususnya proses pengukiran (wood engraving), sebagian besar pelaku usaha kecil dan menengah masih menggunakan metode konvensional yang bergantung pada keterampilan operator. Metode tersebut

menyebabkan kualitas ukiran kurang seragam, waktu pengerjaan relatif lama, serta produktivitas yang rendah sehingga kurang mampu memenuhi kebutuhan produksi secara massal [2].

Salah satu solusi yang berkembang adalah penggunaan CNC Router tiga sumbu (X, Y, dan Z). Mesin ini mampu melakukan proses pemotongan maupun pengukiran secara otomatis berdasarkan desain digital yang dihasilkan melalui perangkat lunak CAD/CAM. Penggunaan CNC Router memberikan keuntungan berupa peningkatan akurasi, repeatability, fleksibilitas bentuk produk, serta efisiensi waktu produksi pada material nonlogam seperti kayu, MDF, akrilik, dan PVC [3].

Penggunaan teknologi open-source hardware dan open-source software mendukung pengembangan mesin CNC berbiaya rendah. Arduino Uno yang dipadukan dengan GRBL firmware dapat

digunakan sebagai sistem kendali untuk menerjemahkan perintah G-code menjadi gerakan pada sumbu mesin. Penerapan sistem tersebut telah digunakan pada CNC Router dan mesin engraving untuk proses penggambaran, pengukiran, dan pemesian ringan, sehingga menjadi alternatif yang sesuai untuk pengembangan mesin CNC sederhana [4][5].

Beberapa penelitian telah mengembangkan CNC Router berbasis GRBL untuk meningkatkan kinerja proses pemesian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan struktur mekanik yang tepat serta sistem kendali berbasis GRBL mampu meningkatkan presisi pergerakan, kemudahan pengoperasian, dan kualitas hasil pengukiran dibandingkan metode konvensional [6].

Kinerja mesin CNC sangat dipengaruhi oleh kekakuan struktur rangka karena beban pemesian dapat menyebabkan deformasi dan getaran yang berpengaruh terhadap ketelitian proses. Penelitian mengenai struktur mesin perkakas menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan struktur diperlukan untuk mengurangi deformasi dan meningkatkan stabilitas mesin [7]. Oleh karena itu, penggunaan aluminium profile sebagai rangka dapat menjadi alternatif dalam pengembangan CNC Router karena material ini memungkinkan konstruksi rangka yang modular dan telah diterapkan pada perancangan rangka CNC Router [8].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang, membangun, dan menguji kinerja mesin CNC Router berbasis firmware GRBL dengan menggunakan rangka aluminium profile. Penggunaan aluminium profile diharapkan mampu meningkatkan kekakuan struktur, mengurangi getaran selama proses pemesian, serta meningkatkan akurasi gerak dibandingkan rancangan berbahan kayu. Selain itu, penelitian ini juga melakukan pengujian akurasi dimensi dan kualitas hasil pengukiran pada material kayu dan akrilik sebagai parameter evaluasi performa mesin. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi alternatif pengembangan CNC Router berbiaya rendah yang memiliki tingkat akurasi tinggi sehingga dapat dimanfaatkan oleh institusi pendidikan, laboratorium, serta industri kecil dan menengah.

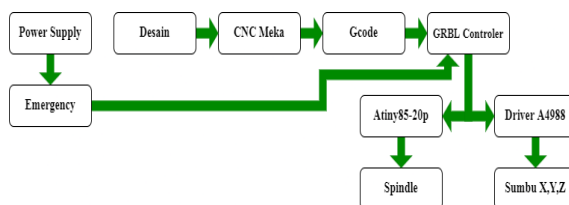
II. METODE PENELITIAN

1. Perancangan Sistem

Prinsip kerja CNC Router diawali dengan pembuatan desain benda kerja menggunakan perangkat lunak CAD/CAM. Desain tersebut selanjutnya dikonversi menjadi G-code yang berisi perintah gerakan dan parameter pemesian. Desain tersebut selanjutnya diproses menjadi G-code yang berisi instruksi mengenai posisi, arah, dan pergerakan

alat potong. G-code kemudian dikirim ke GRBL Controller untuk dibaca dan diterjemahkan menjadi sinyal kendali sesuai dengan perintah yang telah ditentukan.

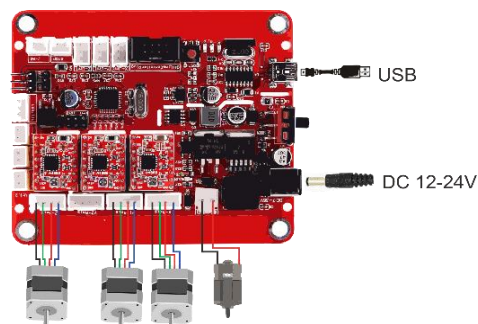
Sinyal dari GRBL Controller diteruskan ke driver A4988 untuk mengendalikan motor stepper pada sumbu X, Y, dan Z, sehingga alat potong mampu bergerak mengikuti lintasan desain. Pada saat yang sama, spindle berfungsi memutar alat potong untuk melakukan proses pemesian, sedangkan power supply menyediakan sumber daya bagi sistem. Selain itu, tombol *emergency stop* digunakan sebagai sistem pengaman untuk menghentikan mesin apabila terjadi kondisi darurat. Adapun perancangan sistem dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Perancangan CNC Router

2. Perancangan Rangkaian Elektronika

Berdasarkan diagram tersebut, power supply berfungsi menyediakan tegangan DC sebesar 12–24 V sebagai sumber daya bagi sistem GRBL Controller dan komponen penggerak CNC. GRBL Controller menerima perintah dari perangkat lunak melalui koneksi USB, kemudian mengolah perintah tersebut menjadi sinyal kendali untuk mengatur kerja motor stepper dan motor spindle.

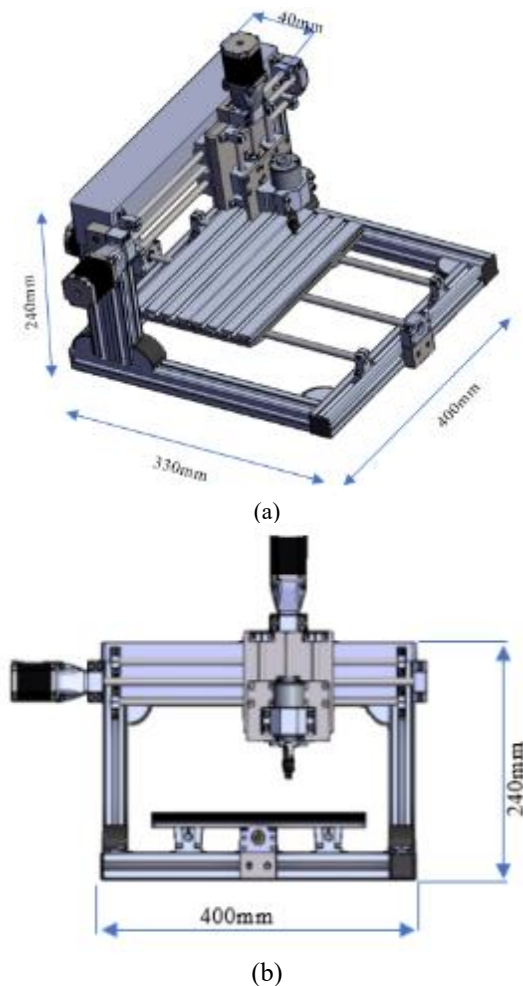


Gambar 2. Rangkaian CNC Router

Motor stepper dikendalikan untuk menghasilkan pergerakan pada sumbu X, Y, dan Z, sedangkan motor spindle berfungsi memutar alat potong sesuai dengan parameter yang telah ditentukan pada program. Dengan demikian, GRBL Controller berperan sebagai pusat kendali yang mengatur pergerakan dan proses pemotongan CNC secara

terkoordinasi berdasarkan instruksi G-code. Rangkaian keseluruhan dari sistem CNC Router dapat dilihat pada Gambar 2 dalam bentuk wiring diagram.

3. Perancangan Prototipe



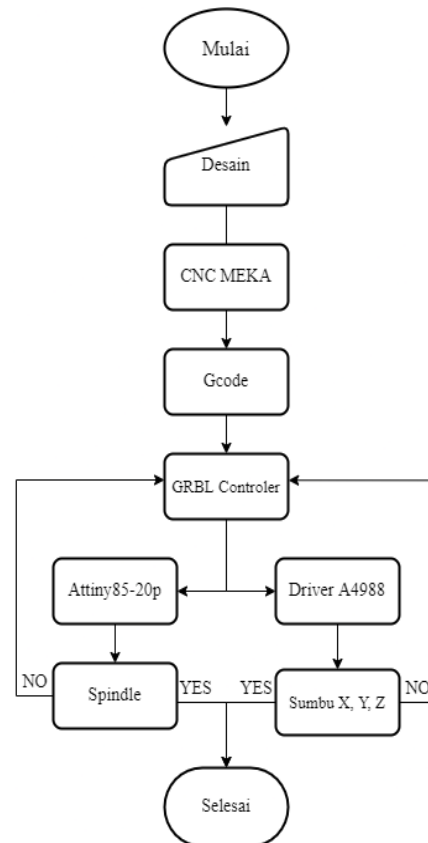
Gambar 3. Perancangan prototipe keseluruhan a. CNC Router, b CNC Router Tampak Depan

Gambar 3 menunjukkan rancangan mekanik CNC Router tiga sumbu yang terdiri atas rangka utama, meja kerja, sistem gantry, motor stepper, mekanisme transmisi, serta spindle sebagai alat pemotong. Berdasarkan dimensi yang ditampilkan, mesin memiliki ukuran keseluruhan 330 mm × 400 mm × 240 mm, sehingga termasuk CNC Router berukuran kompak dan sesuai untuk proses pemesinan benda kerja dengan area terbatas. Struktur rangka berfungsi sebagai penopang utama sekaligus menjaga kekakuan mesin selama proses pemotongan.

Pergerakan mesin dikendalikan melalui tiga sumbu, yaitu X, Y, dan Z. Sumbu X dan Y mengatur pergerakan horizontal *spindle* terhadap meja kerja, sedangkan sumbu Z mengatur pergerakan vertikal

untuk menentukan kedalaman pemotongan. Motor stepper digunakan sebagai aktuator untuk menghasilkan pergerakan yang terkontrol pada masing-masing sumbu. Spindle yang terpasang pada bagian kepala mesin berfungsi memutar alat potong untuk melakukan proses pemotongan, pengukiran, atau pembentukan material sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan melalui G-code.

4. Flowchart CNC Router



Gambar 6. Flowchart Development and Performance Evaluation of a GRBL-Based CNC Router for Non-Metallic Material Engraving

Pada Gambar 6 dijelaskan bahwa proses kerja CNC Router diawali dengan pembuatan desain menggunakan perangkat lunak perancangan dan pemodelan CNC. Desain yang telah dibuat kemudian dikonversi menjadi G-code yang berisi informasi lintasan dan parameter pergerakan alat. Selanjutnya, G-code dimasukkan ke dalam perangkat lunak CNC Meka dan dikirimkan ke GRBL Controller untuk diproses menjadi sinyal kendali sesuai dengan instruksi pemesinan.

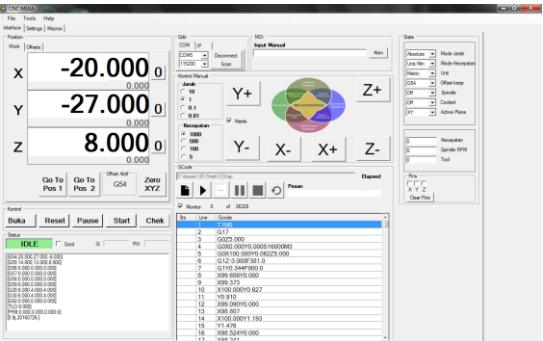
GRBL Controller kemudian mengatur dua bagian utama sistem, yaitu pergerakan sumbu dan putaran spindle. Untuk pergerakan sumbu X, Y, dan Z, GRBL menghasilkan sinyal step dan direction yang diteruskan ke driver A4988 untuk mengendalikan motor stepper. Sementara itu, pengaturan spindle dilakukan melalui ATtiny85-20P

berdasarkan sinyal kendali dari GRBL Controller. Proses berlangsung hingga seluruh perintah G-code selesai dijalankan, sedangkan apabila proses belum selesai, sistem akan terus mengeksekusi perintah berikutnya.

5. Perancangan Software

CNC MEKA merupakan perangkat lunak antarmuka kendali yang digunakan untuk mengoperasikan mesin CNC Router tiga sumbu (3-axis) melalui komputer desktop atau PC. Perangkat lunak ini menyediakan beberapa fungsi utama, seperti pengaturan posisi sumbu X, Y, dan Z, kontrol pergerakan manual (jogging), pengaturan parameter operasi, serta pemuatan dan eksekusi program G-code.

CNC MEKA yang terlihat pada Gambar 7 adalah CNC yang dikembangkan menggunakan Microsoft Visual Studio 2019 dan dirancang untuk berjalan pada sistem operasi Windows. Dalam proses pengendalian, perangkat lunak mengirimkan perintah G-code dari komputer ke GRBL Controller melalui komunikasi serial. Selanjutnya, GRBL Controller menerjemahkan perintah tersebut menjadi sinyal kendali untuk mengatur pergerakan motor pada sumbu X, Y, dan Z sehingga proses pemrosesan dapat dilakukan sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan.



Gambar 7. Software CNC MEKA

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian CNC Router berbasis GRBL dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam melakukan proses engraving pada material non-logam serta memastikan bahwa seluruh komponen bekerja sesuai dengan spesifikasi perancangan. Evaluasi mencakup kemampuan pergerakan sumbu X, Y, dan Z, respons sistem terhadap perintah G-code, serta kestabilan proses pemrosesan selama pengoperasian.

Setelah tahap perancangan, perakitan, dan integrasi sistem kendali selesai dilakukan, diperoleh prototipe CNC Router yang siap digunakan untuk proses pengujian. Gambar 8 menunjukkan hasil akhir

atau setup prototipe CNC Router berbasis GRBL yang digunakan dalam pengujian kinerja pada proses engraving material non-logam.



Gambar 8. Set Up CNC Router

Tabel 1. Hasil Pengujian Kecepatan Motor Spindel

No	Kecepatan	Keterangan
1	0 rpm	Motor mati
2	18500 rpm	Motor hidup

Tabel 2. Hasil Pengujian Tegangan Motor Spindel

No	Tegangan	Keterangan
1	25 V	Motor Tanpa Beban
2	25 V	Motor Ada Beban

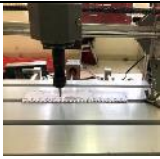
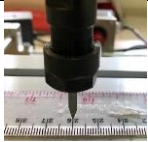
Tabel 3. Hasil Pengujian Arus Motor Spindel

No	Kecepatan	Keterangan
1	0,29 A	Motor Tanpa Beban
2	0,30 A	Motor Ada Beban

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1–3, motor spindle dapat bekerja sesuai dengan perintah kendali yang diberikan oleh Arduino Uno. Pada kondisi aktif, motor spindle mencapai kecepatan sekitar 18.500 rpm, sedangkan pada kondisi tidak aktif kecepatan motor sebesar 0 rpm. Sistem kendali juga memungkinkan pengaturan arah putaran spindle, baik searah maupun berlawanan arah jarum jam, sesuai dengan perintah yang diberikan.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan motor tetap berada pada 25 V, baik pada kondisi tanpa beban maupun dengan beban. Sementara itu, arus mengalami perubahan yang relatif kecil, yaitu dari 0,29 A tanpa beban menjadi 0,30 A saat diberi beban. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa proses pengukiran pada material yang diuji memberikan beban yang relatif ringan terhadap motor spindle. Dengan demikian, motor mampu mempertahankan kondisi operasinya secara stabil selama proses engraving.

Tabel 4. Hasil Pengujian kalibrasi Sumbu X, Y, dan Z

Uji 1	Tampak Jauh 2	Tampak Dekat 3
Pengujian Kalibrasi pada axis X posisi 0		
Pengujian Kalibrasi pada axis X posisi bergerak 10mm.		
Pengujian Kalibrasi pada axis Y posisi 0.		
Pengujian Kalibrasi pada axis Y posisi bergerak 10mm.		
Pengujian Kalibrasi pada axis Z posisi 0.		
Pengujian Kalibrasi pada axis Z posisi bergerak 10mm.		

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, motor stepper mampu menggerakkan mekanisme lead screw pada sumbu X, Y, dan Z sesuai dengan perintah yang diberikan melalui perangkat lunak. Pergerakan motor diteruskan oleh lead screw menjadi gerak linear pada masing-masing sumbu, sehingga posisi alat potong dapat diatur sesuai dengan koordinat yang telah ditentukan.

Pada pengujian kalibrasi, masing-masing sumbu diberikan perintah perpindahan sebesar 10 mm dari posisi awal. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sumbu X, Y, dan Z dapat bergerak mengikuti jarak yang diperintahkan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem penggerak CNC Router mampu merespons perintah kendali dengan baik dan menghasilkan perpindahan linear yang sesuai dengan nilai masukan dari perangkat lunak.

Tabel 5. Hasil Pengujian Error Sumbu X

No	Perintah Gcode	Gerak Sumbu	% Error
1	1 mm	1 mm	0%
2	2 mm	2 mm	0%
3	3 mm	3 mm	0%
4	5 mm	5 mm	0%
5	10 mm	10 mm	0%
6	15 mm	15 mm	0%
7	20 mm	20 mm	0%
8	25 mm	25 mm	0%
9	30 mm	30 mm	0%
10	35 mm	35 mm	0%
11	40 mm	40 mm	0%
12	45 mm	45 mm	0%
13	50 mm	50 mm	0%

Tabel 6. Hasil Pengujian Error Sumbu Y

No	Perintah Gcode	Gerak Sumbu	% Error
1	1 mm	1 mm	0%
2	2 mm	2 mm	0%
3	3 mm	3 mm	0%
4	5 mm	5 mm	0%
5	10 mm	10 mm	0%
6	15 mm	15 mm	0%
7	20 mm	20 mm	0%
8	25 mm	25 mm	0%
9	30 mm	30 mm	0%
10	35 mm	35 mm	0%
11	40 mm	40 mm	0%
12	45 mm	45 mm	0%
13	50 mm	50 mm	0%

Tabel 7. Hasil Pengujian Error Sumbu Z

No	Perintah Gcode	Gerak Sumbu	% Error
1	1 mm	1 mm	0%
2	2 mm	2 mm	0%
3	3 mm	3 mm	0%
4	5 mm	5 mm	0%
5	10 mm	10 mm	0%
6	15 mm	15 mm	0%
7	20 mm	20 mm	0%
8	25 mm	25 mm	0%
9	30 mm	30 mm	0%

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7, pergerakan sumbu X, Y, dan Z pada CNC Router mampu mengikuti perintah G-code yang dikirim melalui perangkat lunak. Pada setiap variasi jarak pengujian, nilai perpindahan aktual yang dihasilkan sesuai dengan nilai perpindahan yang diperintahkan, dengan persentase kesalahan sebesar 0%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem penggerak pada ketiga sumbu dapat merespons perintah kendali dengan baik dan menghasilkan gerakan yang konsisten. Dengan demikian, mekanisme pergerakan CNC Router memiliki tingkat ketepatan yang

memadai untuk mendukung proses engraving pada material non-logam.



Gambar 9. Desain Pembuatan GCode



Gambar 10. Hasil Pengujian Keseluruhan

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 9 dan Gambar 10, CNC Router mampu melakukan proses engraving sesuai dengan desain yang telah dibuat. Desain terlebih dahulu dikonversi menjadi G-code, kemudian dikirim melalui perangkat lunak ke GRBL Controller untuk diterjemahkan menjadi perintah pergerakan sumbu X, Y, dan Z serta pengoperasian spindle. Selama proses pemessinan, pergerakan alat potong mengikuti lintasan yang telah ditentukan pada desain sehingga menghasilkan pola ukiran yang sesuai dengan bentuk rancangan.

Pengujian dilakukan pada desain berukuran 150 mm × 150 mm dengan kedalaman pemotongan sebesar 1 mm. Berdasarkan hasil pengamatan, CNC Router mampu menyelesaikan proses engraving dalam waktu sekitar 1 jam 30 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem CNC Router berbasis GRBL dapat menjalankan perintah G-code dan menghasilkan pola ukiran pada material non-logam sesuai dengan desain yang telah ditentukan.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, CNC Router berbasis GRBL dengan sistem pergerakan tiga sumbu, yaitu X, Y, dan Z, TELAH mampu digunakan untuk proses engraving pada material non-logam seperti kayu dan akrilik. Kinerja mesin dipengaruhi oleh pengaturan kecepatan spindle dan feed rate, karena kedua parameter tersebut berpengaruh terhadap kualitas hasil pemessinan. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin

mampu mengikuti lintasan yang telah ditentukan melalui G-code dan menghasilkan bentuk ukiran yang sesuai dengan desain yang dibuat. Dengan demikian, CNC Router yang dikembangkan dapat beroperasi dengan baik dan memiliki potensi untuk digunakan sebagai mesin engraving pada berbagai material non-logam.

Pengembangan mesin CNC Router pada penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada peningkatan aspek keamanan, kekakuan struktur, dan kebersihan area kerja. Pemasangan limit switch pada setiap batas pergerakan sumbu X, Y, dan Z disarankan untuk mencegah pergerakan berlebih yang dapat menyebabkan benturan atau kerusakan pada komponen mekanik. Selain itu, struktur rangka perlu diperkuat melalui penambahan pelat maupun profil aluminium agar getaran yang terjadi selama proses pemessinan dapat diminimalkan sehingga kestabilan dan ketelitian mesin dapat meningkat. Sistem penghisap debu atau vacuum juga dapat ditambahkan untuk membersihkan serpihan hasil pemotongan selama mesin beroperasi. Pengembangan tersebut diharapkan dapat meningkatkan keamanan, kenyamanan penggunaan, serta kinerja mesin CNC Router secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Asif *et al.*, "Recent Trends , Developments , and Emerging Technologies towards Sustainable Intelligent Machining: A Critical Review , Perspectives and Future Directions," 2023.
- [2] Suyatno, "IMPACT OF NANOPARTICLES AS A HOMOGENEOUS CATALYST N IGNITION CHARACTERISTICS OF WASTE PLASTIC OIL," vol. 16, no. 1, pp. 21–25, 2023.
- [3] R. Ramdani, "Rancang Bangun Mesin Cnc Router Mini 3 Axis," vol. 2, no. 2, pp. 132–143, 2024.
- [4] D. Irwansyah, M. Ula, I. Sahputra, B. N. Sahbana, and F. Arrahman, "Design and building CNC engraving router machine using Arduino Uno with GRBL control system," vol. 8, no. 6, pp. 4570–4584, 2024, doi: 10.55214/25768484.v8i6.2988.
- [5] A. Mechanics *et al.*, "Jurnal Mekanik Terapan Desain CNC Milling 3 Axis Berbasis GRBL," vol. 06, no. 03, pp. 125–133, 2025, doi: 10.32722/jmt.v6i3.7567.
- [6] A. A. Pratama, N. Paramytha, E. Fitriani, and T. Ariyadi, "Rancang Bangun CNC Router Drilling Machine Untuk Mengukur Kayu Dengan Presisi Tinggi Menggunakan Mikrokontroler Dan Sistem Kontrol GRBL," vol. 4, no. 4, pp. 2534–2547, 2025.
- [7] T. Guo, L. Meng, J. Cao, and C. Bai, "An approach to identify the weak parts of stiffness for the machine tool cantilever structure," 2021, doi: 10.1177/0954406221998719.
- [8] R. N. Rafiq, B. T. Karmiati, M. A. Ikaningsih, and L. Nurdini, "Perancangan Rangka Mesin CNC Router Sebagai Alat Penunjang dalam Pembuatan Pola Cetakan pada Pengecoran Logam Skala Laboratorium," vol. 14, no. 1, 2026.