

Rancang Bangun Mesin CNC Drilling Grafir Berbasis Arduino Mega 2560

Bakhtiar¹, Salahuddin², Zamzami³, Rizal Syahyadi⁴, Teuku Zulfadli^{*5}
^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Provinsi Aceh
e-mail: ¹bakhtiar@pnl.ac.id, ²salahuddin.mt@pnl.ac.id, ³zamzami@pnl.ac.id,
⁴rizalsyahyadi@pnl.ac.id, ^{*5}teukuzulfadli@pnl.ac.id

Abstrak

Kemajuan teknologi manufaktur pada era Industri 4.0 telah meningkatkan kebutuhan akan sistem produksi yang mampu memberikan tingkat ketelitian tinggi, fleksibilitas operasional, serta kinerja yang terotomasi. Mesin Computer Numerical Control (CNC) menjadi solusi utama dalam memenuhi kebutuhan industri tersebut karena kemampuannya menghasilkan produk yang konsisten dan presisi. Namun demikian, tingginya biaya pengadaan dan perawatan mesin CNC komersial masih menjadi kendala utama bagi institusi pendidikan vokasi serta usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan mesin CNC drilling dan grafir berbiaya rendah dengan sistem kendali berbasis Arduino Mega 2560. Mesin yang dikembangkan menggunakan motor stepper NEMA 23 untuk menggerakkan tiga sumbu gerak (X, Y, dan Z), yang dikombinasikan dengan sistem linear rail serta mekanisme ballscrew dan lead screw guna menghasilkan pergerakan linear yang halus dan presisi. Firmware GRBL diterapkan sebagai pengendali utama dalam menerjemahkan dan mengeksekusi perintah G-code yang dihasilkan dari perangkat lunak CAD/CAM. Spindle yang digunakan adalah spindle MT 370 dengan daya ± 370 W yang difungsikan untuk proses grafir dan cutting dan Penerapan machining allowance sebesar $-0,05$ mm pada perangkat lunak Aspire terbukti mampu mengurangi deviasi dimensi dan meningkatkan presisi hasil pemesinan. Penelitian terdahulu lebih berfokus pada CNC mini, CNC plotter, atau sistem grafir sederhana dengan material ringan dan dimensi kerja terbatas. Sementara itu, penelitian ini mengembangkan mesin CNC drilling dan grafir dengan penggunaan motor stepper NEMA 23, driver TB 6600, linear rail, dan ballscrew sehingga menghasilkan sistem gerak yang lebih stabil dan presisi. Selain itu, mesin CNC yang dirancang mampu melakukan proses drilling, grafir, dan cutting pada material akrilik dan aluminium. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin CNC yang dikembangkan mampu beroperasi secara andal, menjaga kestabilan kendali gerak, serta mencapai tingkat akurasi yang memadai untuk proses drilling dan grafir. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa mesin CNC drilling dan grafir berbasis Arduino Mega 2560 yang dirancang memiliki kinerja yang cukup baik untuk keperluan pendidikan dan penelitian, serta berpotensi dikembangkan lebih lanjut untuk peningkatan presisi dan otomasi sistem serta layak digunakan sebagai media pembelajaran pada pendidikan vokasi serta sebagai alat pendukung untuk manufaktur ringan dan kegiatan prototipe.

Kata kunci— Mesin CNC Drilling dan Grafir, Arduino Mega 2560, Motor Stepper NEMA, GRBL Firmware, Spindle MT 370

Abstract

Advances in manufacturing technology in the Industry 4.0 era have increased the need for production systems capable of providing high levels of accuracy, operational flexibility, and automated performance. Computer Numerical Control (CNC) machines have become the primary solution in meeting these industrial needs due to their ability to produce consistent and precise products. However, the high cost of procurement and maintenance of commercial CNC machines remains a major obstacle for vocational

education institutions and micro, small, and medium enterprises (MSMEs). To address these issues, this study aims to design and implement a low-cost CNC drilling and engraving machine with an Arduino Mega 2560-based control system. The developed machine uses a NEMA 23 stepper motor to drive three axes of motion (X, Y, and Z), combined with a linear rail system and ballscrew and leadscrew mechanisms to produce smooth and precise linear movements. GRBL firmware is implemented as the primary controller in translating and executing G-code commands generated from CAD/CAM software. The spindle used is an MT370 spindle with a power of ± 370 W which is used for engraving and cutting processes and the application of a machining allowance of -0.05 mm in the Aspire software has been proven to reduce dimensional deviations and increase the precision of machining results. Previous research has focused more on mini CNC, CNC plotter, or simple engraving systems with lightweight materials and limited working dimensions. Meanwhile, this research develops a CNC drilling and engraving machine using a NEMA 23 stepper motor, TB 6600 driver, linear rail, and ballscrew to produce a more stable and precise motion system. In addition, the designed CNC machine is capable of drilling, engraving, and cutting processes on acrylic and aluminum materials. The test results show that the developed CNC machine is able to operate reliably, maintain stable motion control, and achieve an adequate level of accuracy for drilling and engraving processes. Therefore, it can be concluded that the designed CNC drilling and engraving machine based on Arduino Mega 2560 has good performance for educational and research purposes, and has the potential to be further developed to improve system precision and automation and is suitable for use as a learning medium in vocational education as well as a supporting tool for light manufacturing and prototyping activities.

Keywords— CNC Drilling and Engraving Machine, Arduino Mega 2560, NEMA Stepper Motor, GRBL Firmware, MT370 Spindle.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur pada era Industri 4.0 meningkatkan kebutuhan terhadap sistem produksi yang presisi, otomatis, dan efisien. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah mesin Computer Numerical Control (CNC) karena mampu menghasilkan produk dengan tingkat akurasi dan konsistensi yang tinggi. Namun, harga mesin CNC komersial yang relatif mahal masih menjadi kendala bagi institusi pendidikan vokasi dan pelaku UMKM. Perkembangan mikrokontroler open-source seperti Arduino membuka peluang pengembangan mesin CNC berbiaya rendah yang lebih mudah diimplementasikan. Arduino Mega 2560 memiliki kemampuan yang cukup baik untuk mengendalikan sistem CNC tiga sumbu dengan dukungan firmware GRBL sebagai penerjemah perintah G-code dari perangkat lunak CAD/CAM.

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas pengembangan mesin CNC dengan pengendali berbasis Arduino. Mesin CNC berbiaya rendah dapat dimanfaatkan secara efektif dalam kegiatan pendidikan [1]. Mesin CNC plotter mini berbasis Arduino mampu menghasilkan hasil grafir yang cukup baik untuk material ringan [2]. Sementara itu, menyimpulkan bahwa Arduino Mega 2560 menawarkan kinerja yang lebih stabil dibandingkan Arduino Uno dalam aplikasi CNC tiga sumbu [3]. Motor stepper tipe NEMA 23 umum digunakan pada mesin CNC karena memiliki torsi yang memadai untuk proses pengeboran dan grafir. Firmware GRBL berfungsi sebagai penerjemah perintah G-code yang menjembatani desain CAD/CAM dengan sistem penggerak mesin CNC [2], [4]. Dalam penelitian lainnya menyatakan bahwa pemilihan material sangat mempengaruhi kestabilan kerja mesin CNC. Mesin dengan kerangka MDF lebih

cocok untuk pekerjaan ringan seperti grafir pada kayu dan PCB, sedangkan rangka berbasis aluminium lebih optimal untuk tugas-tugas yang membutuhkan akurasi tinggi dan kecepatan putar spindle yang lebih besar [5], [6].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan mesin CNC berbasis Arduino untuk proses grafir dan plotting pada material ringan. Namun, sebagian besar masih menggunakan struktur sederhana dengan tingkat presisi dan kemampuan pemotongan yang terbatas [7]–[15]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk rancang bangun sebuah mesin CNC drilling dan grafir berbasis Arduino Mega 2560 dengan dimensi keseluruhan 100×60 cm. Mesin CNC menggunakan motor stepper NEMA 23 yang dikendalikan oleh driver TB 6600, linear rail, dan ballscrew untuk menghasilkan pergerakan linear yang presisi pada sumbu X, Y, dan Z untuk meningkatkan kestabilan serta ketelitian gerak.

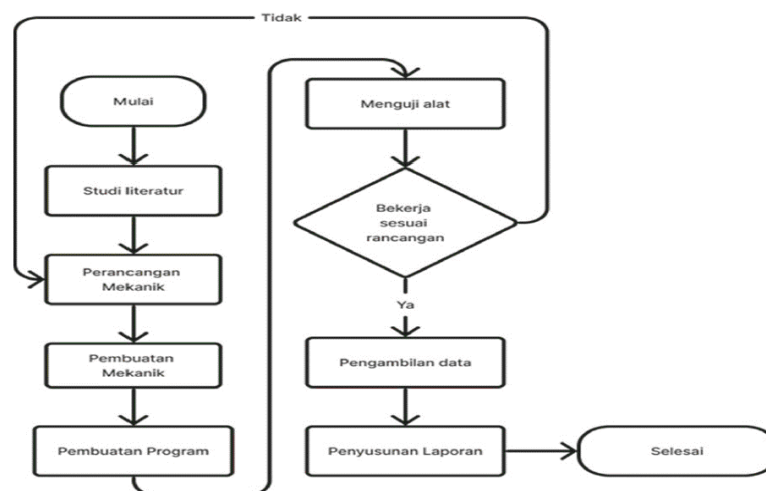
Mesin CNC yang dikembangkan digunakan untuk proses drilling, grafir, dan cutting pada material akrilik dan aluminium. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi pengaruh pengaturan microstepping dan machining allowance terhadap presisi hasil pemesinan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi solusi mesin CNC berbiaya rendah yang dapat dimanfaatkan sebagai media pembelajaran, penelitian, dan aplikasi manufaktur ringan pada pendidikan vokasi maupun UMKM.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental yang meliputi tahapan perancangan, realisasi, pengujian, dan evaluasi sistem. Proses diawali dengan perancangan mekanik dan elektronik menggunakan perangkat lunak bantu desain. Selanjutnya dilakukan perakitan mesin CNC serta pengaturan parameter firmware GRBL. Tahap pengujian dilakukan untuk menilai kinerja, kestabilan, dan tingkat ketelitian mesin.

2.1 Desain Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan metode eksperimental, perancangan dan pengujian serta menganalisa unjuk kerja perangkat yang dihasilkan, baik bagian-bagian dari sistem maupun sistem secara keseluruhan. Adapun tahapan penelitian secara umum digambarkan dalam suatu bentuk diagram alir seperti ditunjukkan dalam gambar 1 dan blok diagram CNC drilling berbasis arduino dan CNC shield V3 pada gambar 2.



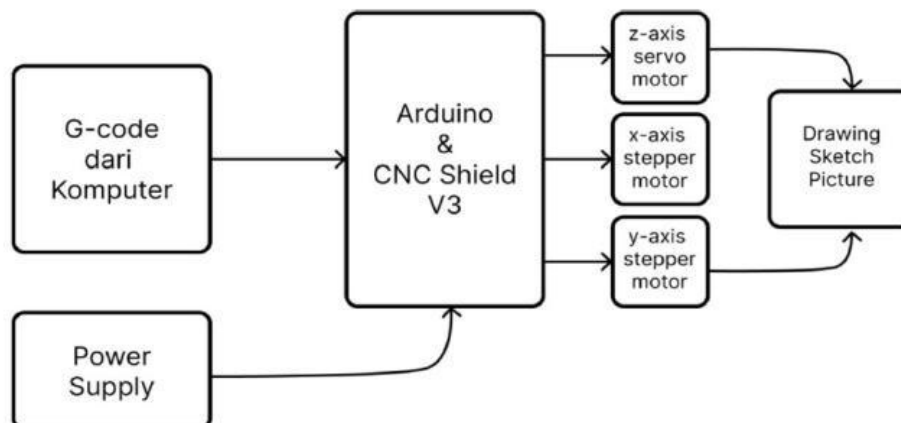
Gambar 1. Diagram alir penelitian

Penjelasan Proses Diagram alir penelitian perancangan mesin CNC drilling dan grafir

1. Mulai, proses tahapan awal penelitian dimulai sebagai titik awal seluruh rangkaian kegiatan.
2. Studi Literatur, proses mengumpulkan referensi dari jurnal, buku, dan penelitian sebelumnya terkait topik mesin CNC drilling dan grafir, komponen Arduino Mega 2560, motor stepper NEMA, GRBL, serta perancangan mekanik.
3. Perancangan Mekanik, proses mendesain struktur mesin CNC, meliputi rangka, linear rail, ballscrew/lead screw,udukan motor, bed kerja, dan sistem transmisi dilakukan dengan software CAD (misalnya SolidWorks atau Fusion 360).
4. Pembuatan Mekanik, proses realisasi dari desain menjadi bentuk fisik untuk proses manufaktur seperti pemotongan, pengeboran, perakitan rangka, dan pemasangan komponen mekanik.
5. Pembuatan Program, proses input program kontrol untuk Arduino menggunakan Arduino IDE dan GRBL Firmware serta mengatur parameter gerakan, step per mm, dan integrasi dengan CAD/CAM software.
6. Menguji Alat, proses menguji kinerja mesin CNC yang sudah dibuat, memastikan semua sumbu bergerak sesuai perintah G-code dan melihat apakah kecepatan, presisi, dan kualitas hasil sesuai rancangan.
7. Keputusan: Bekerja Sesuai Rancangan (Jika Tidak, kembali ke tahap perbaikan seperti perancangan mekanik atau program untuk mengatasi kekurangan. Jika Ya, lanjut ke tahap pengambilan data)
8. Pengambilan Data, proses pengumpulan data hasil uji, seperti waktu pengerjaan, tingkat presisi, kehalusan hasil grafir, dan kestabilan gerakan mesin.
9. Penyusunan Laporan, proses penyusunan hasil penelitian, analisis data, serta dokumentasi proses pembuatan dan pengujian alat ke dalam bentuk laporan atau proposal akhir.
10. Selesai, Proses penelitian berakhir setelah laporan selesai dan semua tujuan tercapai.

2.2 Desain Blok Diagram CNC Drilling Berbasis Arduino dan CNC Shield V3

Gambar 2. menunjukkan rancangan Blok Diagram CNC Drilling Berbasis Arduino dan CNC Shield V3 yang Sistem CNC drilling berbasis Arduino dan CNC Shield V3 bekerja dengan memanfaatkan G-code yang dihasilkan dari perangkat lunak CAD/CAM, seperti Fusion 360 atau Aspire, yang memuat perintah mengenai koordinat posisi, kecepatan, arah pergerakan, serta operasi drilling dan grafir. Data G-code tersebut dikirimkan ke Arduino melalui antarmuka USB atau komunikasi serial untuk diproses oleh firmware GRBL. Catu daya DC sebesar 12–24 V digunakan untuk menyuplai kebutuhan daya Arduino dan motor melalui CNC Shield V3. Arduino berperan sebagai pengendali utama yang menerjemahkan G-code menjadi sinyal pulsa *step* dan *direction* guna menggerakkan motor stepper dan servo pada sumbu X, Y, dan Z. Koordinasi pergerakan ketiga sumbu tersebut menghasilkan keluaran fisik berupa proses pengeboran, pengukiran, atau pembuatan sketsa sesuai dengan desain yang telah ditentukan.



Gambar 2. Desain Blok Diagram CNC Drilling Berbasis Arduino dan CNC Shield V3

Penjelasan Blok Diagram CNC Drilling Berbasis Arduino dan CNC Shield V3

1. G-Code dari Komputer, merupakan data instruksi yang dihasilkan dari software CAD/CAM seperti Fusion 360 atau Aspire. G-code berisi perintah untuk mengatur posisi, kecepatan, arah gerak, dan operasi drilling/grafir pada mesin CNC. G-code dikirim ke Arduino melalui koneksi USB/serial untuk dikonversi menjadi sinyal kendali motor.
2. Power Supply, menyediakan sumber daya listrik untuk seluruh sistem, termasuk motor stepper/servo dan Arduino. Menggunakan 12V–24V DC dengan kapasitas arus yang cukup besar sesuai kebutuhan motor dengan terhubung langsung ke CNC Shield V3 yang kemudian mendistribusikan daya ke motor-motor.
3. Arduino & CNC Shield V3, arduino (umumnya Arduino Uno atau Mega 2560) berperan sebagai pusat kontrol yang memproses G-code. CNC Shield V3 adalah modul tambahan yang dipasang di atas Arduino, mempermudah koneksi motor stepper, limit switch, dan spindle. Arduino menjalankan firmware GRBL yang berfungsi menginterpretasikan G-code menjadi sinyal pulsa (step dan direction) untuk driver motor stepper. Menghasilkan sinyal kendali untuk motor pada sumbu X, Y, dan Z.
4. Motor Stepper dan Servo Motor seperti Z-axis Servo Motor, mengontrol gerakan naik-turun spindle atau pena. Servo biasanya digunakan jika hanya memerlukan gerakan terbatas (misalnya untuk menggambar/sketsa). X-axis Stepper Motor, menggerakkan meja atau spindle secara horizontal pada arah X (kiri-kanan). Y-axis Stepper Motor, menggerakkan meja atau spindle pada arah Y (depan-belakang). Fungsi Motor Stepper, memungkinkan kontrol posisi yang presisi sesuai pulsa yang diterima dari CNC Shield.
5. Drawing / Sketch Picture (Hasil Kerja), merupakan output fisik dari proses CNC, seperti drilling (pengeboran), engraving (pengukiran), atau menggambar pola. Dengan proses semua gerakan sumbu X, Y, dan Z bekerja sama untuk menghasilkan bentuk sesuai G-code.

2.3 Spesifikasi Motor, Driver, Software

Berikut ini data spesifikasi peralatan pendukung penelitian, dapat di lihat pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Peralatan Penelitian

No	Nama Peralatan	Spesifikasi
1	Motor Stepper	NEMA 23 Sudut langkah : 1,8° Langkah per putaran : 200 step Torsi maksimum : 1,2–3 Nm Tegangan kerja : 24–48 V
2	Driver Motor Stepper	TB 6600 Full step : 200 step/rev 1/2 step : 400 step/rev 1/4 step : 800 step/rev 1/8 step : 1600 step/rev 1/16 step : 3200 step/rev
3	Arduino Board	Mega 2560 Mikrokontroler : ATmega 2560 Tegangan kerja : 5 V Tegangan input : 7–12 V Pin digital I/O : 54 Pin analog : 16 Clock : 16 MHz
4	Software	Candle (GRBL Controller) versi 1.12 CorelDRAW 2021

2.4 Desain Perancangan Mesin CNC Drilling dan Grafir Berbasis Arduino Mega 2560

Rancangan mekanik mesin CNC drilling dan grafir dengan dimensi 100 cm x 60 cm, menggunakan rangka aluminium profil tipe 2040 dan 4040 yang dikombinasikan dengan linear rail sebagai pemandu gerak. Sistem transmisi menggunakan ballscrew dan lead screw untuk menghasilkan pergerakan linear yang presisi. Pada sisi elektronik, sistem dikendalikan oleh Arduino Mega 2560 yang terhubung dengan CNC Shield dan driver motor TB6600. Catu daya 24V digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya motor dan sistem kontrol.



Gambar 3. Desain Perancangan Mesin CNC Drilling dan Grafir Berbasis Arduino Mega 2560

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini mencakup berbagai kondisi pengujian dan pengukuran parameter pada alat robot manipulator pemindah objek berwarna yang dirancang sebagai media pembelajaran. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian pembacaan jarak objek terhadap sensor proximity serta pengujian nilai RGB untuk objek dengan warna merah, hijau, dan biru.

3.1 Pengujian Sistem Gerak

Sistem gerak dan Kendali Pengujian sistem gerak dilakukan untuk memastikan bahwa setiap sumbu mesin CNC dapat bergerak sesuai dengan perintah yang diberikan melalui G-code. Pengujian meliputi gerakan maju-mundur, kanan-kiri, dan naik-turun pada masing-masing sumbu X, Y, dan Z. Pengujian ini dilakukan, bertujuan untuk mengevaluasi kinerja motor stepper NEMA 23 yang dikendalikan oleh driver TB 6600 mampu bergerak secara sinkron dan stabil. Hasil pengujian menunjukkan motor stepper Tidak ditemukan kegagalan fungsi pada sistem gerak selama pengujian tanpa beban. Proses homing menggunakan limit switch juga berjalan dengan baik dan menghasilkan titik nol mesin yang konsisten. Pengujian sistem kendali juga mencakup pengaturan parameter GRBL, khususnya nilai steps/mm, kecepatan maksimum, dan percepatan. Parameter tersebut disesuaikan dengan karakteristik mekanik mesin untuk menghindari kehilangan langkah (*lost step*) disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Fungsi Gerak Sumbu

Sumbu	Arah Gerak	Hasil Pengujian
X	Kanan-kiri	Normal
Y	Maju-mundur	Normal
Z	Naik-turun	Normal

3.2 Pengujian Resolusi Gerak Berdasarkan Microstepping TB6600

Driver TB6600 pada mesin CNC ini diatur pada mode microstepping 1/16 step. Pengaturan ini dilakukan untuk meningkatkan resolusi gerak dan mengurangi getaran motor stepper. Dengan motor stepper 200 step per revolusi dan ballscrew berpitch 5 mm, diperoleh nilai resolusi gerak teoritis sebesar 640 step/mm. Untuk melihat pengaruh microstepping terhadap resolusi gerak, dilakukan perhitungan resolusi pada beberapa variasi microstep. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa peningkatan nilai microstep berbanding lurus dengan peningkatan resolusi gerak mesin. Hubungan antara microstep dan resolusi gerak divisualisasikan dalam bentuk grafik linier. Grafik tersebut menunjukkan tren peningkatan resolusi yang signifikan hingga microstep 1/16. Pada penelitian ini, microstepping 1/16 dipilih karena memberikan keseimbangan terbaik antara ketelitian gerak dan stabilitas system ditampilkan pada tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh Microstepping TB 6600 Terhadap Resolusi Gerak

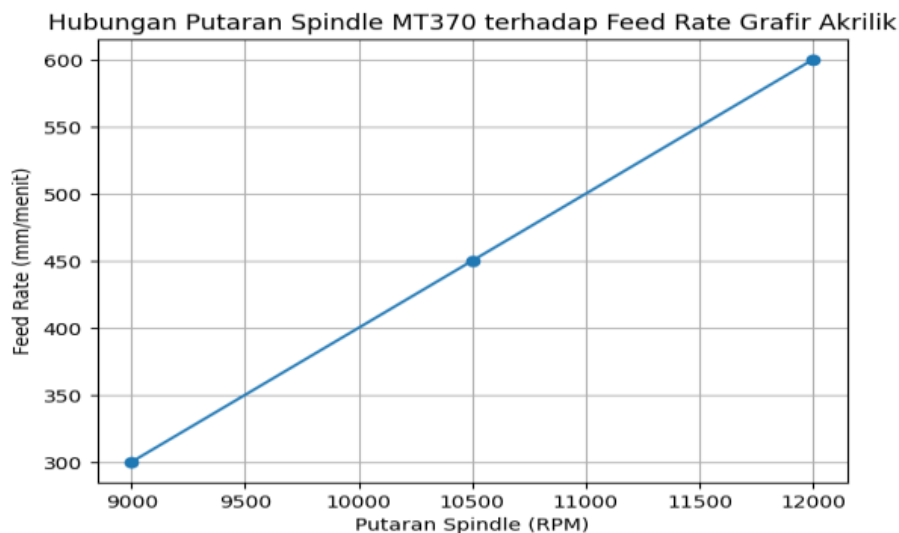
Microstep	Langkah/Revolusi	Resolusi (step/mm)
1	200	40
1/2	400	80
1/4	800	160
1/8	1600	320
1/16	3200	640

3.3 Pengujian Grafir Akrilik

Pengujian grafir akrilik, spindle MT 370 dioperasikan pada rentang putaran menengah hingga tinggi untuk memperoleh hasil grafir yang halus dan meminimalkan terjadinya leleh material akibat panas berlebih. Akrilik memiliki sifat termoplastik sehingga pemilihan parameter pemesinan, khususnya kecepatan putar spindle dan feed rate, sangat berpengaruh terhadap kualitas permukaan hasil grafir. Pengambilan data dilakukan dengan variasi parameter pemesinan yang disesuaikan dengan karakteristik spindle MT 370. Parameter tersebut meliputi kecepatan putar spindle (rpm), kecepatan makan (feed rate), dan kedalaman pemotongan (depth of cut). Pengaturan parameter dilakukan secara konservatif untuk menjaga kestabilan proses pemesinan serta menghindari beban berlebih pada spindle. Tabel 4 menunjukkan parameter pemesinan grafir akrilik yang digunakan pada penelitian ini dengan spindle MT 370. Parameter ini dipilih berdasarkan hasil percobaan awal dan referensi praktis penggunaan spindle router berdaya ± 370 W.

Tabel 4. Parameter Pemesinan Grafir Akrilik Menggunakan Spindle MT370

Parameter	Nilai
Putaran spindle	9.000 – 12.000 rpm
Feed rate	300 – 600 mm/menit
Depth of cut	0,5 – 1,0 mm
Diameter mata router	3 mm
Jenis mata router	End mill / engraving bit
Pendinginan	Udara (tanpa coolant)



Gambar 4. Hubungan Putaran Spindle MT370 terhadap Feed Rate Grafir Akrilik

Berdasarkan gambar 4. penggunaan parameter tersebut menghasilkan proses grafir yang relatif stabil dengan kualitas tepi grafir yang halus dan minim burr. Namun demikian, peningkatan feed rate yang terlalu tinggi dapat menyebabkan getaran ringan pada sumbu Z akibat keterbatasan kekakuan struktur dan daya spindle.

3.4 Pengujian Cutting Aluminium

Pengujian Cutting pada Material Aluminium Pengujian cutting dilakukan pada material aluminium untuk mengevaluasi kemampuan mesin CNC dalam memotong material logam ringan. Proses cutting dilakukan secara bertahap dengan depth of cut kecil untuk menjaga kestabilan mesin. Hasil pengujian pada tabel 5. menunjukkan bahwa mesin CNC mampu melakukan proses cutting aluminium tanpa mengalami kegagalan pemotongan. Akan tetapi, kualitas permukaan hasil potong masih dipengaruhi oleh getaran dan gaya pemotongan yang relatif besar. Pengukuran dimensi hasil cutting menunjukkan adanya deviasi yang lebih besar dibandingkan hasil grafir pada akrilik. Hal ini disebabkan oleh karakteristik material aluminium yang lebih keras.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Cutting Aluminium

Dimensi Desain (mm)	Dimensi Aktual (mm)	Deviasi (mm)
50	49,90	-0,10
30	29,92	-0,08
20	19,91	-0,09

3.5 Pengujian Pengaruh Machining Allowance terhadap Presisi

Deviasi dimensi, dilakukan pengaturan machining allowance sebesar $-0,05$ mm pada perangkat lunak Aspire. Pengaturan ini bertujuan mengompensasi kesalahan dimensi yang muncul selama proses pemesinan. Hasil pengujian tabel 6 menunjukkan bahwa penggunaan machining allowance mampu menurunkan nilai deviasi secara signifikan, baik pada proses grafir maupun cutting. Dimensi hasil pemesinan menjadi lebih mendekati ukuran desain.

Tabel 6. Pengujian Perbandingan Deviasi Sebelum dan Sesudah Machining Allowance

Material	Deviasi Tanpa Allowance (mm)	Deviasi Dengan Allowance (mm)
Akrilik	$-0,05$	$-0,01$
Aluminium	$-0,10$	$-0,04$

3.6 Pembahasan Kinerja Mesin CNC

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, mesin CNC drilling dan grafir berbasis Arduino Mega 2560 mampu beroperasi dengan stabil dan menghasilkan hasil pemesinan yang cukup presisi untuk aplikasi pendidikan dan penelitian. Pengaturan microstepping TB 6600 terbukti meningkatkan kehalusan gerak dan kualitas hasil grafir. Meskipun demikian, keterbatasan sistem kendali open-loop dan kekakuan struktur mesin masih menjadi faktor pembatas dalam mencapai presisi yang lebih tinggi, khususnya pada pemesinan material aluminium. Oleh karena itu, diperlukan optimasi lanjutan pada struktur mekanik dan sistem kendali untuk meningkatkan performa mesin CNC.

Hasil pengujian menunjukkan penyebab deviasi dimensi dipengaruhi oleh beberapa faktor mekanik dan sistem kendali pada mesin CNC. Salah satu penyebab utama adalah getaran (vibrasi) yang muncul saat proses pemotongan, terutama pada material aluminium. Getaran terjadi akibat putaran spindle yang tinggi dan gaya potong yang cukup besar sehingga mempengaruhi kestabilan gerak sumbu mesin.

Selain itu, kekakuan struktur mesin juga berpengaruh terhadap tingkat presisi. Rangka mesin yang menggunakan aluminium profil masih memiliki fleksibilitas tertentu sehingga dapat mengalami sedikit defleksi ketika menerima beban pemotongan. Kondisi ini menyebabkan posisi tool tidak sepenuhnya sesuai dengan koordinat desain.

Faktor lain yang mempengaruhi deviasi adalah sistem kendali open-loop pada motor stepper. Pada kondisi beban tinggi, motor stepper berpotensi mengalami kehilangan langkah (lost step), terutama jika percepatan dan kecepatan motor terlalu besar. Hal ini menyebabkan pergeseran posisi gerak dan menghasilkan ukuran aktual yang berbeda dari desain.

Pengaturan parameter pemesinan seperti kecepatan motor, kedalaman pemotongan, dan putaran spindle juga mempengaruhi kualitas hasil pemotongan. Kecepatan gerakan motor sumbu X, Y dan Z yang terlalu tinggi dapat meningkatkan gaya potong dan memperbesar getaran mesin. Oleh karena itu, penerapan machining allowance sebesar $-0,05$ mm dan pengaturan microstepping 1/16 digunakan untuk mengurangi deviasi dimensi dan meningkatkan ketelitian hasil pemesinan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil seluruh tahapan penelitian yang telah dilakukan, mulai dari perancangan, pembuatan, pengujian, hingga analisis kinerja mesin CNC drilling dan grafir berbasis Arduino Mega 2560, berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan baik. Sistem yang dikembangkan memiliki performa yang stabil, tingkat ketelitian yang memadai, serta biaya pembuatan yang relatif terjangkau. Spindle yang digunakan adalah spindle MT 370 dengan daya ± 370 W yang difungsikan untuk proses grafir dan cutting pada rentang putaran 9.000-12.000 rpm dan penerapan machining allowance sebesar $-0,05$ mm pada perangkat lunak Aspire terbukti mampu mengurangi deviasi dimensi dan meningkatkan presisi hasil pemesinan terhadap desain. Dengan demikian, mesin CNC ini berpotensi digunakan sebagai media pembelajaran di pendidikan vokasi dan sebagai alat bantu produksi bagi UMKM.

5. SARAN

Penelitian ini masih memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut dengan pengembangan perangkat lunak dapat dilakukan dengan mengintegrasikan antarmuka pemantauan berbasis komputer atau Internet of Things (IoT) untuk memantau kinerja mesin secara real-time.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada Politeknik Negeri Lhokseumawe atas dukungan pendanaan yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini melalui kontrak SPK Nomor 3951/PL20/PT.01.03/2025 yang bersumber dari dana DIPA PNL Tahun Anggaran 2025. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pihak, baik individu maupun tim, yang telah berkontribusi dan berperan dalam penelitian ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. S. Ram and S. P. Ranganathan, "Design and Development of a Low-Cost Open-Source Arduino- Based CNC Controller for Special Purpose Machines," vol. 2, no. 5, pp. 16–21, 2025.
 - [2] I. Dnyaneshwar, S. V. Mehere, S. A. Patil, and A. S. Sohoni, "Mini CNC Profile Plotter Using Arduino," vol. 4, no. 4, pp. 277–280, 2026.
 - [3] A. K. J, W. Dsouza, and R. Kumar, "Design of CNC Machine Based Laser Engraver with Arduino UNO," no. August, 2022.
 - [4] H. W. Handani, S. R. Sulistiyanti, and Y. Yulianti, "Rancang Bangun Mesin CNC Laser 4 Axis menggunakan Motor Stepper Tipe Nema 23 Terintegrasi Mach3 USB untuk
-

-
- Aplikasi Mesin Cutting Otomatis,*” vol. 13, no. 02, pp. 13–22, 2025.
- [5] G. D. Clifford, G. B. Moody, and M. Algorithms, “*Low cost and open source software-based CNC router for machining contours Low cost and open source software-based CNC router for machining contours,*” 2020, doi: 10.1088/1757-899X/872/1/012084.
- [6] V. Kumar, S. K. Chatterjee, and K. Chatterjee, “*Experimental Analysis of Design Fabrication and Motion Analysis of Portable CNC Router Using GRBL Board,*” vol. 13, no. 5, 2024, doi: 10.15680/IJIRSET.2024.1305565.
- [7] M. R. Ardiansyah, U. Bambang, and K. Kunci, “*Pengembangan Program Interpreter G-code dan Motion Control untuk Mesin CNC Milling 3 Axis Tipe VMC-100,*” pp. 26–27, 2020.
- [8] A. Abdulah *et al.*, “*Bhakti Wastukencana,*” vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2025.
- [9] S. V Tawade, “*Design And Manufacturing Of A 3- Axis CNC Drilling Machine For Small,*” vol. 9, no. 1, pp. 400–407, 2022.
- [10] M. N. Khan and M. Shadman, “*Study and Design of Arduino Based CNC Laser Cutting Machine Study and Design of Arduino Based CNC Laser Cutting Machine*”, doi: 10.1088/1757-899X/1224/1/012008.
- [11] S. Hadi and R. E. Perkasa, “*Design and Simulation of CNC Milling Machine on Matlab,*” vol. 4, no. 3, 2021.
- [12] E. Suryono, A. Prasetyo, B. Margono, and A. Rahmatulloh, “*Pengembangan Pola Pembelajaran Pemograman CNC Melalui Integrasi G Code , Simulator CNC Dan CAM Computer Numerical Controlled atau yang sering dikenal dengan istilah mesin CNC adalah,*” vol. 4, no. November, pp. 219–224, 2023.
- [13] K. B. P, “*Arduino Based 3 Axis PCB Drilling Machine,*” vol. 4, no. 6, pp. 255–259, 2016.
- [14] 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.
- [15] U. Eko, W. Harso, and B. S. Wijanarka, “*Penerapan Project-Based Learning dalam Meningkatkan Kompetensi Teknologi Pemesinan Computer Numerical Control Siswa SMK,*” vol. 10, no. 3, pp. 2558–2565, 2026.
-