

Rancang Bangun Mesin CNC Laser 4 Axis menggunakan Motor Stepper Tipe Nema 23 Terintegrasi Mach3 USB untuk Aplikasi Mesin Cutting Otomatis

Hesti Wahyu Handani^(1,a), Sri Ratna Sulistiyanti^(1,b), Yanti Yulianti^(1,c),
Posman Manurung^(1,d), dan Junaidi^(1,e)

⁽¹⁾Jurusan Fisika, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia, 35141

Email: ^(a)hesti.handani@gmail.com, ^(b)sr_sulistiyanti@eng.unila.ac.id, ^(c)yanti.yulianti@fmipa.unila.ac.id,
^(d)reip65@yahoo.com ^(e)junaidi.1982@fmipa.unila.ac.id

Diterima (27 Mei 2024), Direvisi (11 Maret 2025)

Abstract. The design and manufacture of a 4-axis CNC Laser machine using a stepper motor type Nema 23 integrated with Mach3 USB for automatic cutting machine applications has been carried out. This tool is a manufacturing laboratory tool that is used to cut acrylic material automatically with cutting dimensions reaching 1000 mm x 2000 mm. This tool has a cutting edge in the form of a 40-watt diode laser which is capable of cutting acrylic sheets with a thickness of 3 mm. This tool is controlled using the Mach3 controller board and communicated with the Mach3 software using commands in the form of G-code. This tool is capable of cutting 3 mm thick acrylic sheets with a maximum speed of 55 mm/minute. For optimal cutting results, the acrylic cutting process is carried out at a distance of 15 mm from the laser to the acrylic. This tool has a relative error of 0.27% and a deviation of 0.25 mm. Based on these specifications, this CNC Laser machine can be applied for automatic cutting machines for acrylic-based materials.

Keyword: CNC, Mach3, stepper motor nema23, motor stepper driver TB6600, diode laser.

Abstrak. Perancangan dan pembuatan mesin CNC Laser 4 Axis menggunakan motor stepper tipe nema 23 terintegrasi Mach3 USB untuk aplikasi mesin cutting otomatis telah dilakukan. Alat ini merupakan suatu alat laboratorium bidang manufaktur yang digunakan untuk memotong material berbahan akrilik secara otomatis dengan dimensi pemotongan mencapai 1000 mm x 2000 mm. Alat ini memiliki mata potong berupa laser dioda ukuran 40 watt yang mampu memotong lembaran akrilik dengan ketebalan 3 mm. Alat ini dikontrol menggunakan kontroler Mach3 board dan dikomunikasikan dengan software Mach3 menggunakan perintah berupa G-code. Alat ini mampu memotong lembaran akrilik ketebalan 3 mm dengan kecepatan maksimum 55 mm/menit. Untuk hasil pemotongan optimal, proses pemotongan akrilik dilakukan pada jarak laser terhadap akrilik yaitu sejauh 15 mm. Alat ini memiliki kesalahan relatif yaitu 0,27% dan deviasi sebesar 0,25 mm. Berdasarkan spesifikasi tersebut, mesin CNC Laser ini dapat diaplikasikan untuk mesin cutting otomatis untuk material berbahan dasar akrilik.

Kata Kunci : CNC, Mach3, motor stepper nema23, driver motor stepper TB6600, laser dioda.

PENDAHULUAN

Laboratorium adalah suatu tempat yang digunakan untuk melakukan kegiatan praktikum dan penelitian menggunakan peralatan berdasarkan metode keilmuan

tertentu untuk menunjang proses belajar dan mengajar sebagai pelayanan kepada masyarakat [1]. Laboratorium di era modern saat ini memiliki perkembangan yang sangat pesat khususnya di bidang teknologi manufaktur. Perkembangan

laboratorium ini didukung oleh peralatan laboratorium yang semakin canggih. Peralatan laboratorium adalah mesin, perkakas, perlengkapan dan alat-alat kerja lain yang secara khusus dipergunakan untuk pengujian, kalibrasi, dan/atau produksi dalam skala terbatas [2].

Terdapat beberapa jenis alat laboratorium, seperti alat ukur, alat uji, serta alat pendukung perbengkelan. Peralatan perbengkelan yang dimaksud yaitu alat yang digunakan sebagai media pembuatan suatu produk. Salah satu contoh dari produk tersebut yaitu akrilik. Akrilik merupakan suatu bahan plastik polimer yang menyerupai kaca sehingga sering dipakai menjadi substitusi kaca. Akrilik memiliki kejernihan yang lebih besar serta ukurannya juga lebih ringan daripada kaca. Berbagai macam produk yang diperoleh dari olahan akrilik seperti plakat, cinderamata, maupun *casing* dari sebuah alat laboratorium.

Sejauh ini, dalam mengolah akrilik tersebut, diperlukan tenaga dan keterampilan dalam mengukir maupun memotong serta memakan waktu yang cukup lama dalam membuat suatu produk. Salah satu alat yang mungkin akan sangat diperlukan di bengkel tersebut yaitu alat pemotong otomatis, biasa disebut dengan *Computer Numerical Control (CNC)* laser.

Pada dasarnya mesin CNC adalah salah satu sistem otomatisasi yang dikendalikan oleh komputer dengan menggunakan bahasa numerik berupa angka dan huruf untuk bergerak sesuai pola desain dan sistem mekanik mesin CNC. Mesin CNC terdiri dari komponen-komponen utama seperti rangka, sistem panel kontrol sumbu X, Y, dan Z. Konsep CNC yang akan dikembangkan pada penelitian ini ditujukan pada mesin mesin konvensional di lingkungan sekitar yang masih menggunakan cara manual sehingga penerapannya menjadi lebih mudah.

Terdapat jenis CNC *router* yang merupakan penggabungan dari konsep

mesin CNC dan mesin *router* [3]. CNC *router* ini digunakan untuk menggambar pola *Printed Circuit Board (PCB)* secara otomatis menggunakan suatu perangkat lunak (*software*) pada *Personal Computer (PC)* lalu dikonversi dalam bentuk *Geometry Code (G-Code)* [4]. CNC *router* atau bisa disebut dengan CNC *milling* juga dapat dikontrol menggunakan *software G-code Reference Block Library (GRBL)* melalui PC yang didesain dengan bantuan perangkat lunak *diptrace* yang digunakan untuk otomatisasi pengambilan skema elektronik dan tata letak PCB [5].

Selain itu, sistem CNC juga dikembangkan menggunakan laser sebagai mata potongnya. CNC laser ini digunakan untuk menggrafir dan mengukir media kerja menggunakan laser [6]. CNC laser juga dapat digunakan untuk mengukir atau mencetak tulisan secara otomatis menggunakan metode *Design for Assembly* serta menggunakan material berbahan dasar kayu dan akrilik [7]. Penggunaan laser ternyata dapat digunakan untuk memotong material kayu dan akrilik, sehingga dilakukan pembuatan CNC Laser *Cutting* yang merupakan penggabungan teknologi *Computer Numerical Control (CNC)* dan laser. Prototipe mesin *CNC Laser Cutting* ini memiliki dimensi mesin 900 mm x 900 mm x 950 mm dengan menggunakan jenis laser *diode* memiliki panjang gelombang 405 nm dan daya 2500 mW dengan ketelitian pemotongan 0,01 mm [8].

Bagian mesin CNC pada umumnya terdapat sistem mekanik dan sistem elektrik yang bisa disebut juga kontroler mesin. Salah satu perangkat lunak yang digunakan untuk mengotrol mesin CNC tersebut adalah *Mach3* berbasis PC. Cara pengoperasian mesin dengan perangkat lunak ini dikontrol dengan memasukan data berupa perintah dengan kode angka, huruf dan simbol menjadi bentuk gerakan mesin. *Input* berupa gambar desain 3D dengan ketebalan, panjang dan lebar bisa ditentukan dan tingkat akurasi presisi

tinggi, sehingga pengguna hanya perlu menggambar desain ukiran maupun potongan di PC dan alat akan mengukir atau memotong secara otomatis sesuai dengan desain yang telah dibuat.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian ini bermaksud untuk mengembangkan mesin CNC yaitu membuat mesin CNC laser yang dapat digunakan untuk memotong dengan dimensi bidang kerja yang cukup besar yakni 1000 mm x 2000 mm menggunakan sistem kontrol dan perangkat lunak *Mach3* berbasis PC yang memudahkan operator untuk mengoperasikannya serta material kerjanya dikhususkan untuk akrilik.

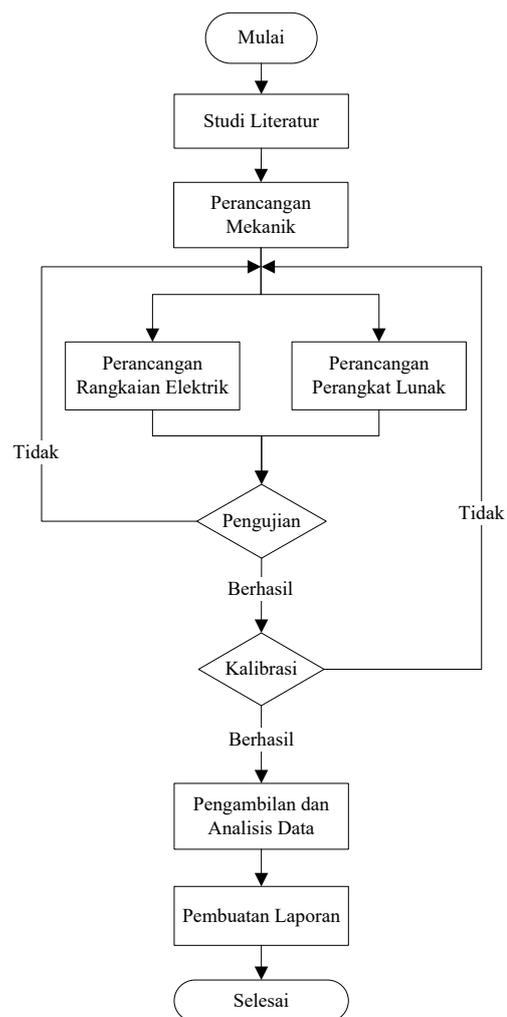
METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, dilakukan rancang bangun mesin CNC laser. CNC laser merupakan mesin yang melakukan pergerakan geometri yang dikendalikan oleh kontroler *Mach3* dalam melakukan proses pemotongan suatu bahan akrilik. *Mach3* merupakan kontroler yang digunakan sebagai penghubung antara komputer dengan aktuator berupa sinyal *input* atau *output*. *Software* yang digunakan yaitu *Mach3* berfungsi untuk melakukan pemrosesan dan pemantauan mesin CNC. Diagram alir dalam melakukan penelitian ini adalah seperti pada **Gambar 1**.

Perancangan mekanik dilakukan dengan melakukan realisasi terhadap rangka CNC laser. Pergerakan geometri mesin CNC laser ini melibatkan 4 buah motor *stepper* beserta *driver* motor *stepper*. Motor *stepper* mampu menghasilkan gerakan geometri berupa gerakan translasi dengan bantuan teknik konversi dari gerakan rotasi menjadi gerakan translasi. Teknik konversi yang digunakan yaitu *leadscrew* dan *timing belt*. Pergerakan translasi pada sumbu X menggunakan 1 buah motor *stepper* dan menggunakan teknik konversi *timing belt*. Pergerakan translasi pada sumbu Y menggunakan 2 buah motor

stepper yang diletakkan pada sisi kanan dan kiri rangka CNC dan menggunakan teknik konversi berupa *timing belt*. Sedangkan pergerakan translasi pada sumbu Z menggunakan 1 buah motor *stepper* dan menggunakan teknik konversi berupa *leadscrew*.

Timing belt dan *leadscrew* merupakan 2 teknik konversi yang berbeda. *Timing belt* menggunakan *belt* berbentuk gerigi dihubungkan dengan *pulley* yang berada pada poros motor *stepper* serta *holder* laser dipasang pada ujung *belt*. Sedangkan *leadscrew* menggunakan besi ulir yang dipasang pada poros motor *stepper* serta mur yang dihubungkan dengan *holder* laser dan dipasangkan pada besi ulir.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Laser dioda digunakan sebagai media dalam melakukan proses pemotongan akrilik. Prinsip kerja laser yaitu laser terbentuk dari sinar laser dioda berdaya rendah yang digabungkan menjadi satu. Untuk menggabungkan sinar-sinar tersebut, sinar-sinar tersebut harus memiliki panjang gelombang yang berbeda [9]. Prinsip penggabungan tersebutlah yang digunakan untuk melakukan proses pemotongan material berbahan dasar akrilik. Seberkas cahaya yang dipancarkan dalam bentuk intensitas cahaya koheren, monokromatik dan terkolimasi (fokus) [10] akan menghasilkan suhu tinggi pada titik tertentu, sehingga akrilik yang ditembakkan oleh laser akan mencapai titik didihnya (meleleh) [11]. Tembakan laser akan mengikuti pola yang telah digambar melalui PC, sehingga mesin CNC laser mampu memotong akrilik dengan pola tertentu.

Setelah perancangan mekanik selesai, selanjutnya yaitu perancangan elektrik dan *software*. Perancangan rangkaian elektrik dilakukan dengan melakukan *wiring* terhadap kontroler CNC yaitu *Mach3 board*. Rangkaian kontroler CNC dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Mach3 board adalah kontroler yang digunakan sebagai penghubung antara komputer dengan aktuator berupa sinyal *input* atau *output* [12]. Kontroler *Mach3* terhubung dengan *driver* motor *stepper* berfungsi untuk mengendalikan pergerakan motor *stepper* melalui *driver* motor *stepper*. *Driver* motor *stepper* yang digunakan yaitu TB6600 digunakan sebagai pengatur *response* kecepatan motor *stepper*. Minimum frekuensi yang bisa diterima oleh *driver* motor TB6600 adalah 50 Hz sedangkan untuk maksimal frekuensi yang dapat diterima dari *driver* motor ini adalah 20 kHz. Maksimal arus yang dapat dihasilkan adalah 4,5 A dengan voltase minimal adalah 20 volt dan voltase maksimal adalah 32 volt [13]. *Driver* motor *stepper* TB6600 ini berfungsi sebagai perangkat pengontrol putaran dan kecepatan

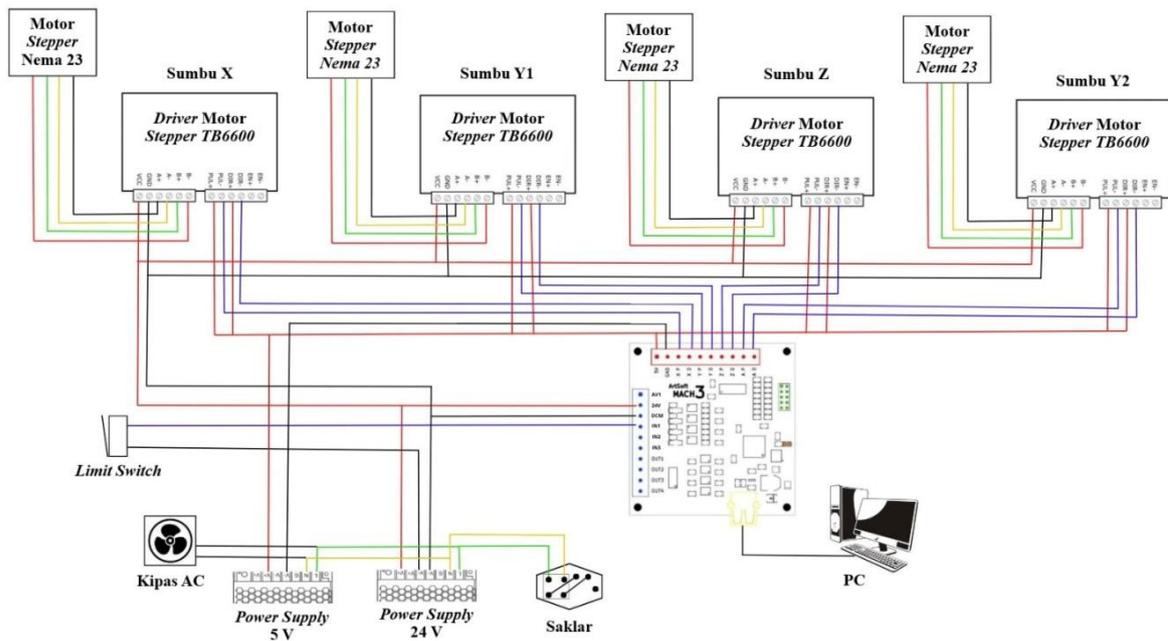
motor *stepper*. Motor *stepper* yang digunakan yaitu motor *stepper* tipe *nema 23*.

Motor *stepper* adalah perangkat elektromekanis yang bekerja dengan mengubah pulsa elektronis menjadi gerakan mekanis diskrit [14]. Motor *stepper* adalah salah satu jenis motor yang putarannya berdasarkan langkah (*step*) [15]. Satu langkah didefinisikan sebagai putaran sudut (dalam derajat) motor setiap kali menerima pulsa listrik [16]. Motor *stepper* menerjemahkan instruksi-instruksi digital yang disimpan pada *controller* untuk menghasilkan gerak putar yang presisi [17].

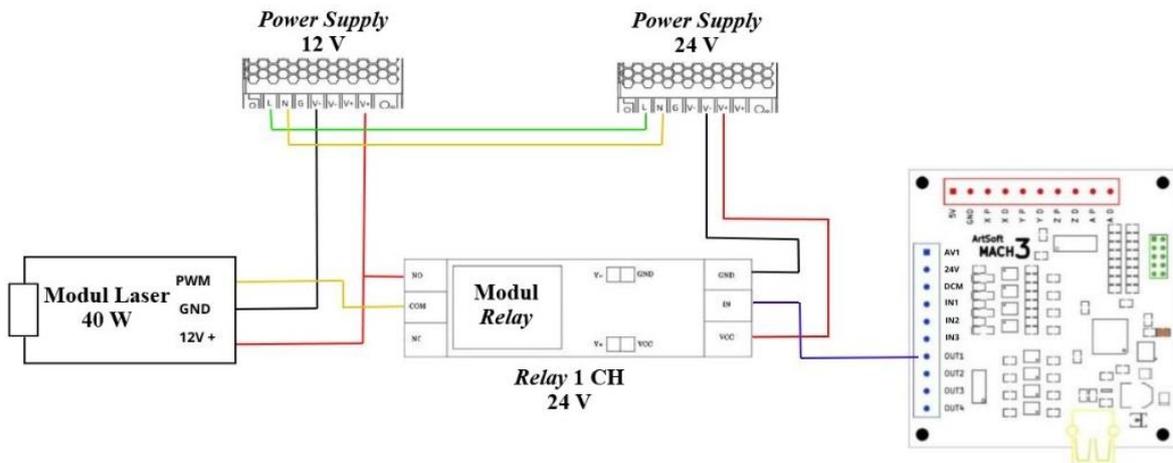
Motor *stepper* terdiri dari poros putaran berupa magnet permanen, yang disebut rotor, dan elektromagnet pada bagian stasioner yang mengelilingi motor, yang disebut stator [18]. Rotor (*shaft*) motor *stepper* berotasi dalam kenaikan langkah diskrit ketika pulsa perintah listrik diterapkan ke motor dalam urutan yang sesuai. Urutan pulsa berhubungan dengan arah putaran motor. Kecepatan rotasi motor ini berhubungan dengan frekuensi yang diberikan [19].

Terdapat komponen tambahan yang dikendalikan oleh *Mach3* yaitu kipas bersumber tegangan AC. Fungsi dari kipas ini adalah untuk mengeluarkan udara panas yang ada di dalam *box* panel kontroler. *Box* panel kontroler yang dibuat berisi kontroler *Mach3* sebanyak 1 buah, *driver* motor *stepper* TB6600 sebanyak 4 buah, *power supply* 24 V dan 12V sebanyak masing-masing 1 buah, dan *relay* 24 V sebanyak 1 buah.

Selain itu, terdapat komponen *limit switch* yang berperan sebagai *input* pada kontroler *Mach3*. *Limit switch* digunakan sebagai pembatas pergerakan motor *stepper* di setiap sumbu. Pembatasan pergerakan motor *stepper* ini berfungsi agar pergerakan CNC tidak melebihi bidang kerja yang disediakan.



Gambar 2. Desain Rangkaian Kontroler CNC



Gambar 3. Desain Rangkaian Output Laser

Spindle merupakan nama *output* di perangkat lunak *Mach3* yang biasa digunakan untuk pengoperasian *router*. Namun, pada penelitian ini menggunakan laser sebagai media potongnya. Oleh sebab itu, bisa dianggap bahwa arti *spindle* pada kasus ini merupakan pin *output* untuk pengaturan *pulse width modulation* (PWM) pada laser. PWM akan bekerja ketika pada perangkat lunak *Mach3* khususnya pada *setup spindle* diubah berdasarkan kebutuhan laser. Namun, karena pada

penelitian ini menggunakan laser dioda 40 watt, *output* dari laser ini masih belum cukup digunakan untuk pemotongan akrilik yang tebal. Sehingga, pin *output spindle* diatur agar selalu mengeluarkan tegangan maksimum apabila laser dalam keadaan beroperasi.

Tegangan *output* pada pin *output 1* ini sebesar 24 V. Namun tegangan maksimum yang mampu diterima oleh laser yaitu 12V. Pada penelitian ini, tidak menggunakan komponen penurun tegangan, melainkan

menggunakan saklar otomatis berupa *relay*. Penelitian ini memerlukan tambahan komponen *power supply* 12 V dan *relay* yang mampu menerima tegangan sebesar 24 V. *Relay* ini juga berperan sebagai saklar otomatis menggunakan metode dengan posisi awal *Normally Open* (NO), yakni dalam keadaan *open circuit* (tidak ada arus yang mengalir). Ketika *relay* diberi tegangan 24 V, maka posisi rangkaian berubah menjadi *Normally Close* (NC), yakni dalam keadaan *close circuit* (ada arus yang mengalir).

Rangkaian laser dan *relay* bisa dilihat pada Gambar 2. Pada rangkaian tersebut, pin *output relay* yang digunakan yaitu *Normally Open* (NO). Pin tersebut yang mampu memutus arus listrik secara otomatis. Kabel yang terhubung pada *output* dari *relay* yaitu kabel yang menghubungkan antara pin PWM pada laser dan pin *power supply* V+ 12V. Jadi, ketika rangkaian keseluruhan dialiri arus listrik, maka keadaan laser akan tetap dalam keadaan *off* dan ketika kontroler *Mach3* diberi perintah menggunakan *M-code* M3, keadaan laser akan berubah menjadi *on* dengan cara memberikan sinyal agar *relay* dalam keadaan *Normally Close* (NC). Sebaliknya, ketika kontroler *Mach3* diberi perintah menggunakan *M-code* M5, maka keadaan laser akan berubah kembali menjadi *off*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

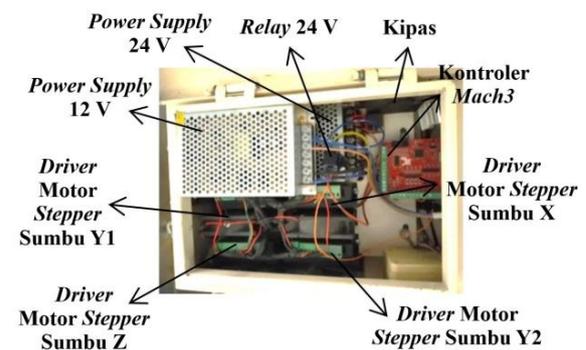
Realisasi CNC Laser pada Gambar 4, diawali dengan realisasi mekanik yaitu membuat rangka CNC berbahan dasar alumunium dengan dimensi bidang kerja di sumbu X 1000 mm, sumbu Y 2000 mm dan sumbu Z mencapai 100 mm. Dimensi tersebut pada mesin CNC mampu untuk memotong akrilik berbentuk lembaran.

Setelah itu, realisasi rangkaian elektrik juga dilakukan, dikhususkan pada rangkaian kontroler CNC Laser. CNC Laser ini menggunakan mikrokontroler *Mach3*

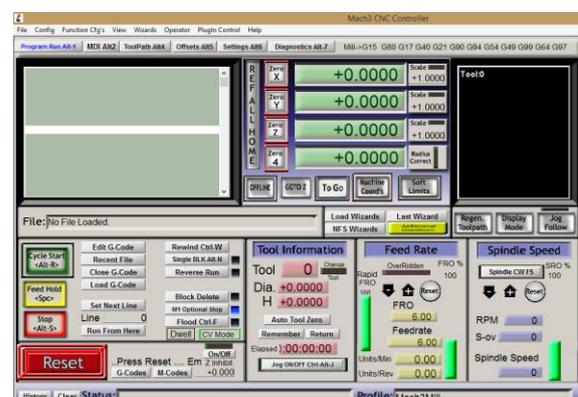
yang mampu mengontrol pengoperasian motor *stepper* dan laser. Komponen motor *stepper* digunakan untuk membuat pergerakan geometri, sedangkan laser digunakan untuk memotong akrilik. *Mach3 board* melakukan pengontrolan terhadap motor *stepper* dan laser membutuhkan komponen pendukung seperti *driver* motor *stepper*, *relay*, dan *power supply*. Komponen pendukung tersebut diletakkan pada sebuah *box* seperti pada Gambar 5.



Gambar 4. Realisasi CNC Laser



Gambar 5. Rangkaian kontroler CNC Laser



Gambar 6. Tampilan Software *Mach3*

Driver motor *stepper* yang digunakan yaitu tipe TB6600, *power supply* yang digunakan yaitu 24 V dan 12 V dan *relay* yang digunakan yaitu *relay* 24 V. Pada rangka CNC, diletakkan 4 buah motor *stepper* tipe *nema 23* dan laser dioda 40 watt. *Stepper nema23* yaitu motor *stepper* bertipe bipolar yang memiliki torsi tinggi berfungsi sebagai aktuator penggerak *roller* pada bagian penarik [13].

Selain itu, perancangan *software* juga dilakukan dengan melakukan pengaturan pada *software Mach3*. Peraturan yang dilakukan yaitu mengubah *input* pada *software Mach3* dan disesuaikan dengan *wiring* yang ada di kontroler *Mach3 board*. *Input* yang dihubungkan pada kontroler *Mach3* yaitu *limit switch*. Sedangkan *output* yang dihubungkan pada kontroler *Mach3* yaitu 4 buah motor *stepper* beserta *driver* motor *stepper* dan laser. Tampilan utama pada *software Mach3* dapat dilihat pada **Gambar 6**.

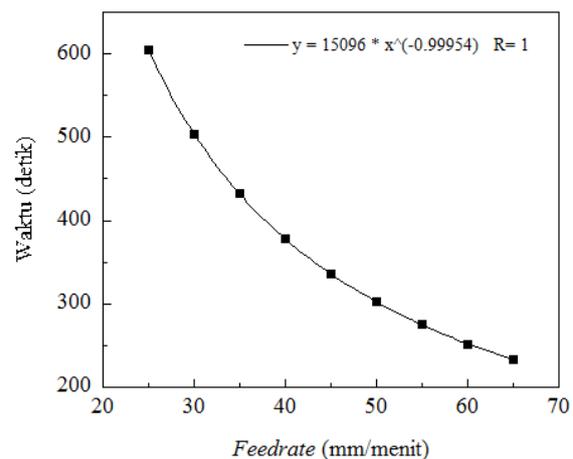
Selanjutnya yaitu melakukan kalibrasi jarak pergeseran mata laser dengan satuan mm, sehingga *output* dari CNC Laser sesuai dengan *input* yang diberikan melalui *G-code*. Setelah kalibrasi, selanjutnya melakukan penyesuaian terhadap *feedrate* dengan waktu pemotongan, sehingga diperoleh grafik seperti pada **Gambar 7**.

Setelah *feedrate* dan waktu pemotongan sesuai, selanjutnya proses pengambilan data dilakukan dengan melakukan pemotongan akrilik hitam solid berdimensi 1000 mm x 2000 mm dan ketebalan 3 mm. Pengambilan data dilakukan dengan tujuan agar menemukan titik fokus pada laser sehingga hasil potong menjadi lebih akurat. Variasi tinggi laser terhadap akrilik dan kecepatan pergerakan laser menjadi tujuan utama dalam melakukan pengambilan data, sehingga diperoleh hasil pemotongan terbaik yaitu pada *feedrate* 55 mm/menit dan jarak laser terhadap akrilik yaitu 15 mm. Hasil pemotongan terbaik ini mencakup kedalaman dan lebar dari hasil pemotongan.

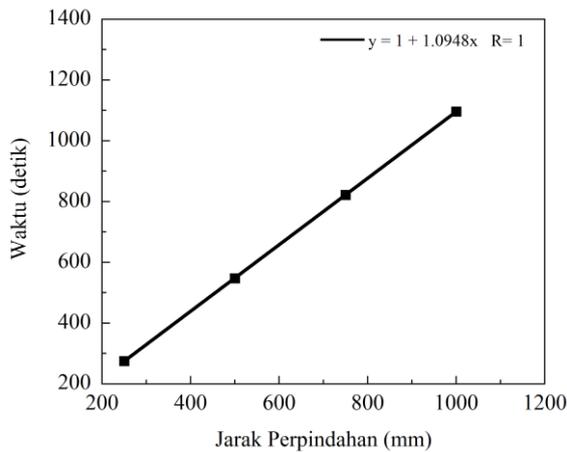
Semakin tipis hasil pemotongan maka kualitas pemotongan semakin baik.

Setelah diperoleh hasil pemotongan terbaik, selanjutnya yaitu menguji pengaruh jarak perpindahan laser terhadap waktu dengan *feedrate* 55 mm/menit. Diperoleh grafik seperti pada **Gambar 8**.

Selanjutnya pengambilan data akurasi dan presisi juga dilakukan. Pengambilan data akurasi dilakukan dengan memotong akrilik berupa garis lurus bervariasi, yaitu 250 mm, 500 mm, 750 mm, dan 1000 mm pada sumbu X dan sumbu Y. Diperoleh nilai kesalahan pada masing masing jarak. Pada jarak 250 mm, kesalahan relatif yang diperoleh pada sumbu X yaitu 0,4% dan pada sumbu Y yaitu 0,4%. Pada jarak 500 mm, kesalahan relatif yang diperoleh pada sumbu X yaitu 0,3% dan pada sumbu Y yaitu 0,2%. Pada jarak 750 mm, kesalahan relatif yang diperoleh pada sumbu X yaitu 0,13% dan pada sumbu Y yaitu 0,2%. Pada jarak 1000 mm, kesalahan relatif yang diperoleh pada sumbu X yaitu 0,2% dan pada sumbu Y yaitu 0,2%. Sehingga kesalahan relatif rata rata pada sumbu X yaitu sebesar 0,29% dan kesalahan relatif rata rata pada sumbu Y yaitu sebesar 0,25%.



Gambar 7. Grafik pengaruh *feedrate* terhadap waktu pemotongan



Gambar 8. Grafik pengaruh jarak perpindahan laser terhadap waktu.

Pengambilan data presisi juga dilakukan dengan memotong akrilik berupa garis lurus sepanjang 500 mm sebanyak 4 kali percobaan. Pada nilai *input* 500 mm di sumbu X, nilai *output* pada pengujian pertama yaitu sebesar 498,5 mm. Nilai *output* pada pengujian kedua yaitu sebesar 498 mm. Nilai *output* pada pengujian ketiga yaitu sebesar 498 mm. Nilai *output* pada pengujian keempat yaitu sebesar 498,5 mm. Sehingga nilai deviasi rata rata pada sumbu X yaitu 0,25.

Pada nilai *input* 500 mm di sumbu Y, nilai *output* pada pengujian pertama yaitu sebesar 499 mm. Nilai *output* pada pengujian kedua yaitu sebesar 499,5 mm. Nilai *output* pada pengujian ketiga yaitu sebesar 499 mm. Nilai *output* pada pengujian keempat yaitu sebesar 499,5 mm. Sehingga nilai deviasi rata rata pada sumbu Y yaitu 0,25. Berdasarkan perolehan nilai deviasi yang relatif kecil, dapat disimpulkan bahwa CNC laser memiliki presisi yang tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu CNC laser ini mampu memotong akrilik lembaran dengan dimensi panjang x lebar yaitu 2000 mm x 1000 mm dengan kesalahan relatif rata-rata yaitu sebesar

0,27% dan deviasi rata-rata yaitu 0,25 mm. CNC laser mampu memotong akrilik dengan kecepatan maksimum yaitu 55 mm/menit dan hasil potong terbaik diperoleh dari jarak laser terhadap akrilik sejauh 15 mm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Afifah dan A. P. Astuti, "Pengaruh Kondisi Laboratorium terhadap Keterampilan Proses Sains Siswa SMA Negeri 11 Semarang (Deskriptif Kualitatif)," *Seminar Nasional Pendidikan*, hal. 195–199, 2017.
- [2] R. Raharjo, "Pengelolaan Alat Bahan dan Laboratorium Kimia," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 20, no. 2, hal. 99–104, 2017.
- [3] K. Ma'arif, M. Yusril, A. Sunding, dan N. R. Wibowo, "Rancang Bangun Mesin CNC Router," *Jurnal Tematis*, vol. 3, no. 1, hal. 1–7, 2021.
- [4] M. R. A. Hasibuan, Muhaimin, dan S. Hardi, "Rancang Bangun Mesin CNC Milling 3- Axis untuk Enggrave PCB Berbasis Arduino Uno," *Jurnal Tektro*, vol. 3, no. 1, hal. 40–47, 2019.
- [5] M. Jufrizaldy, I. Ilyas, dan M. Marzuki, "Rancang Bangun Mesin CNC Milling menggunakan Sistem Kontrol GRBL untuk Pembuatan Layout PCB," *Jurnal Mesin Sains Terapan*, vol. 4, no. 1, hal. 37–44, 2020.
- [6] A. Yanto, Anrinal, dan I. M. Putra, "Desain dan Analisis Struktur Mesin CNC Laser Engraver," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 2, hal. 107–116, 2021.
- [7] A. Muchlis, W. Ridwan, dan I. Z. Nasibu, "Rancang Bangun Mesin

- CNC (Computer Numerical Control) Laser dengan Metode Design for Assembly,” *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 3, no. 1, hal. 23–27, 2021.
- [8] A. Salam, S. Rasyid, F. Ta’bi, dan R. Fahrival, “Rancang Bangun Mesin CNC Laser Cutting untuk Pembelajaran Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin,” *SINERGI*, vol. 18, no. 1, hal. 1–7, 2020.
- [9] E. A. Gyasi, A. Antila, P. Owusu-Ansah, P. Kah, and A. Salminen, “Prospects of Robot Laser Cutting in the Era of Industry 4 . 0,” *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 639–655, 2022.
- [10] M. Ikhsan dan U. Ridhani, “Analisis Pengaruh Radiasi Sinar Laser Dioda terhadap Sublimasi Silk Fabric Daya Maksimum 5,5 Watt,” *Jurnal Tematis*, vol. 4, no. 1, hal. 29–35, 2022.
- [11] Sunarto, B. Tjahjono, N. Hidayati, dan E. Saputra, “Pengaruh Kecepatan Potong Mesin CNC Laser Cutting terhadap Akurasi Potong untuk Efisiensi Proses Blanking,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 18, no. 3, hal. 453–462, 2023.
- [12] A. B. Nugroho, M. A. Auliq, dan M. Z. Alrasyid, “Analisa Perbandingan Performansi Akurasi Mesin CNC (Computer Numerical Control) Router Berbasis Mach3 dan Arduino Uno menggunakan Metode SQC (Statistical Quality Control),” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 2, no. 2, hal. 75–86, 2020.
- [13] Rachman, M. Herman, A. Fitriati, dan Y. Elviralita, “Rancang Bangun Mesin Penekuk Kawat Baja Spring Bed Berbasis Mikrokontroler,” *Mechatronics Journal in Professional and Entrepreneur*, vol. 1, no. 2, hal. 41–48, 2019.
- [14] N. Soedjarwanto, G. F. Nama, dan R. A. Nugroho, “Prototipe Smart Door Lock menggunakan Motor Stepper Berbasis IOT (Internet of Things),” *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 15, no. 2, hal. 73–82, 2021.
- [15] Suryati, Misriana, A. Fauziah, dan W. Mellyssa, “Pengaturan Gerakan Translasi Menggunakan Motor Stepper,” *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, vol. 3, no. 1, hal. 89–94, 2019.
- [16] V. K. Mehta and M. Rohit, *Principle of Electrical Machine*. New Delhi: S. Chand and Company Limited, 2002.
- [17] G. B. Muntoha, I. E. Wati, dan M. S. Wijaya, “Perancangan Sistem Instrumentasi dan Kontrol Berbasis Super PLC F2424 serta Antarmuka LabVIEW,” *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 3, no. 2, hal. 61–65, 2022.
- [18] T. S. Roy, H. Kabir, and M. Chowdhury, “Simple Discussion on Stepper Motors for the Development of Electronic Device,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 5, no. 1, pp. 1089–1096, 2014.
- [19] A. H. Patonra, S. Masita, N. R. Wibowo, dan A. Fitriati, “Rancang Bangun Media Pembelajaran Praktik Motor Stepper,” *Mechatronics Journal in Professional and Entrepreneur*, vol. 2, no. 1, hal. 7–11, 2020.

