

**RANCANG BANGUN MESIN CNC LASER 4 AXIS MENGGUNAKAN  
MOTOR *STEPPER* TIPE NEMA 23 TERINTERGRASI *MACH3* USB  
UNTUK APLIKASI MESIN *CUTTING* OTOMATIS**

**Oleh**

**HESTI WAHYU HANDANI**

**TESIS**



**MAGISTER FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

## ABSTRAK

### RANCANG BANGUN MESIN CNC LASER 4 AXIS MENGGUNAKAN MOTOR *STEPPER* TIPE NEMA 23 TERINTERGRASI *MACH3* USB UNTUK APLIKASI MESIN *CUTTING* OTOMATIS

Oleh

**HESTI WAHYU HANDANI**

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 0,29 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.

## **ABSTRACT**

### **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**

**By**

**HESTI WAHYU HANDANI**

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 0.29 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.

**RANCANG BANGUN MESIN CNC LASER 4 AXIS MENGGUNAKAN  
MOTOR *STEPPER* TIPE NEMA 23 TERINTERGRASI *MACH3* USB  
UNTUK APLIKASI MESIN *CUTTING* OTOMATIS**

Oleh

*Hesti Wahyu Handani*

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
**MAGISTER SAINS**

Pada

Program Studi Magister Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Lampung



**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

Judul Tesis : **RANCANG BANGUN MESIN CNC LASER 4  
AXIS MENGGUNAKAN MOTOR *STEPPER*  
TIPE NEMA 23 TERINTERGRASI *MACH3*  
USB UNTUK APLIKASI MESIN *CUTTING*  
OTOMATIS**

Nama Mahasiswa : ***Hesti Wahyu Handani***

Nomor Pokok Mahasiswa : 2127041001

Program Studi : Magister Fisika

Jurusan : Fisika


Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

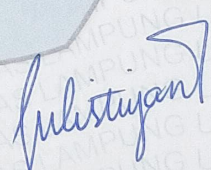


**1. Komisi Pembimbing**

Pembimbing Utama

Pembimbing Pembantu

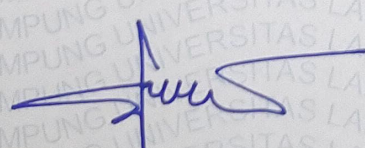
  
**Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.**  
NIP. 19820618 200812 1 001

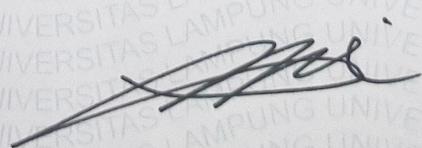
  
**Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.**  
NIP. 19651021 199512 2 001

**2. Mengetahui**

Ketua Jurusan Fisika

Ketua Program Studi Magister Fisika

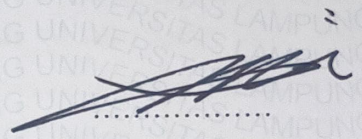
  
**Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si, M.T.**  
NIP. 19801010 200501 1 002

  
**Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.**  
NIP. 19820618 200812 1 001

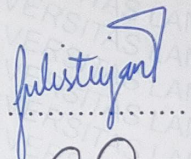
**MENGESAHKAN**

1. Tim penguji

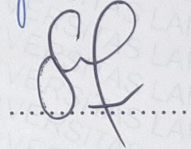
Ketua : **Dr. Junaidi, S.Si, M.Sc.**



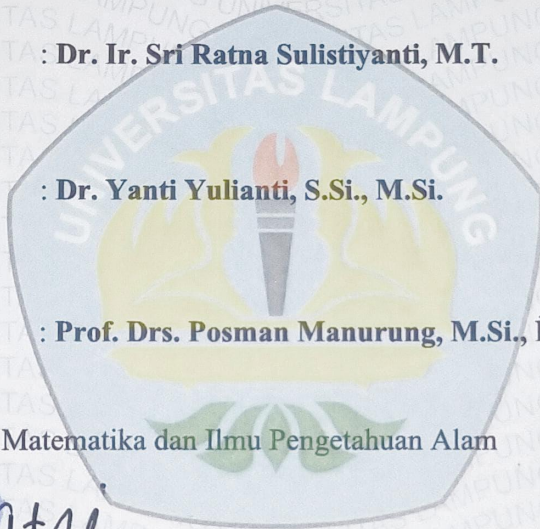
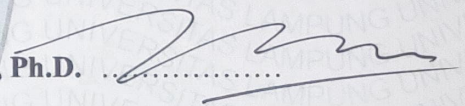
Sekretaris : **Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.**



Penguji Anggota 1 : **Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.**



Penguji Anggota 2 : **Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.**

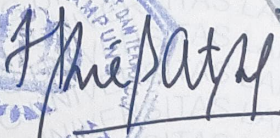


2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**Drs. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.**

NIP. 19711001 200501 1 002



3. Direktur Program Pascasarjana



**Prof. Drs. Ir. Murhadi, M.Si.**

NIP. 19640326 198902 1 001



Tanggal Lulus Ujian Tesis : **30 Mei 2024**

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa tesis ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, Juni 2024



**Hesti Wahyu Handani**  
NPM. 2127041001

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Lampung Tengah pada tanggal 2 Mei 1997, anak pertama dari pasangan Bapak Slamet Efendi dan Ibu Suwarni.

Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Negeri 1 Labuhan Dalam pada tahun 2008, SMP Negeri 19 Bandar Lampung pada Tahun 2011, MAN 1 (Model) Bandar Lampung pada tahun 2014, dan S1 Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung pada Tahun 2019.

Penulis melanjutkan studi dan terdaftar sebagai mahasiswa di Program Studi Magister Fisika Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung pada tahun 2021. Penulis menyelesaikan tesis dengan judul “Rancang Bangun Mesin CNC Laser 4 Axis menggunakan Motor *Stepper* Tipe Nema 23 Terintegrasi *Mach3* USB untuk Aplikasi Mesin *Cutting* Otomatis”.



**MOTTO**

*“MAN JADDA WAJADA”*

*“TERUS MENJADI DIRI SENDIRI”*

*“HABIS GELAP TERBITLAH TERANG”*

*(R.A. Kartini)*

*“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”*

*(QS. Alam Nasyroh : 5-6)*

Dengan penuh rasa syukur, Tesis ini kupersembahkan kepada

*Ibunda dan Ayahanda*

yang telah mendidik dan membesarkan penulis dengan  
penuh kasih sayang

*Adik serta keluarga*

yang selalu memberi nasihat, motivasi serta dorongan  
kepada penulis

*rekan kerja*

atas segala bentuk dukungan yang telah diberikan

Serta almamater tercinta

*Universitas Lampung*

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul “Rancang Bangun Mesin CNC Laser 4 Axis menggunakan Motor *Stepper* Tipe Nema 23 Terintegrasi *Mach3* USB untuk Aplikasi Mesin *Cutting* Otomatis”.

Pembuatan tesis ini dilaksanakan dari bulan Juli 2023 sampai bulan Maret 2024 bertempat di Workshop Laboratorium Fisika Dasar Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Penekanan dalam tesis ini adalah pembuatan alat laboratorium berupa mesin laser *cutting* otomatis yang dapat dimanfaatkan pada bidang manufaktur.

Penulis menyadari bahwa penyajian tesis ini masih banyak kekurangan dalam penulisan maupun referensi data. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan tesis ini. Semoga tesis ini dapat bermanfaat dan menjadi rujukan untuk penelitian berikutnya agar lebih sempurna.

Bandar Lampung, Juni 2024

Penulis

## SANWACANA

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul “Rancang Bangun Mesin CNC Laser 4 Axis menggunakan Motor *Stepper* Tipe Nema 23 Terintegrasi *Mach3* USB untuk Aplikasi Mesin *Cutting* Otomatis”.

Penulis menyadari bahwa dalam melakukan penelitian tidak lepas dari dukungan, bimbingan, motivasi serta do'a dari pihak lain. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Mama dan Bapak tercinta yang selalu memberikan kasih sayang yang tak terhingga kepada penulis.
2. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing I yang senantiasa memberi ilmu pengetahuan dan wawasan serta bimbingan kepada penulis serta selaku ketua Prodi Magister Fisika FMIPA Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa membimbing penulis selama penelitian.
4. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji I yang senantiasa memberi saran kepada penulis dalam melakukan penelitian.
5. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. selaku Dosen Penguji II yang senantiasa memberi saran kepada penulis selama melakukan penelitian serta selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa membimbing bimbingan kepada penulis selama masa kuliah.
6. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si, M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak Drs. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.

8. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si. selaku Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
9. Seluruh Dosen serta Staf Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
10. Teman seperjuangan prodi Magister Fisika angkatan 2021, kakak tingkat dan adik tingkat.
11. Serta semua pihak yang tidak penulis cantumkan satu persatu, yang telah memberikan bantuan moril maupun materil kepada penulis.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya, serta kita senantiasa selalu dalam lindungan Allah SWT. Aamiin..

Bandar Lampung, Juni 2024

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	5
C. Tujuan Penelitian.....	5
D. Batasan Masalah.....	6
E. Manfaat Penelitian.....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
A. Penelitian Terkait .....	7
B. <i>Computer Numerically Controlled (CNC)</i> .....	10
C. <i>Mach3</i> .....	15
D. <i>Driver Motor Stepper TB6600</i> .....	22
E. <i>Motor Stepper</i> .....	17
F. Pemrograman Kode G dan M pada mesin CNC <i>milling</i> .....	22
G. Laser Dioda .....	27
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	33
A. Tempat dan Waktu Penelitian .....	33
B. Alat dan Bahan .....	33
C. Prosedur Penelitian.....	34
D. Perancangan Alat.....	38

E. Teknik Pengambilan Data .....	44
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>47</b>
A. Realisasi Alat.....	47
B. Data dan Hasil Penelitian .....	58
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>78</b>
A. Kesimpulan.....	78
B. Saran.....	79
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>80</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>83</b>

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Rancangan Mesin CNC 3-Axis.....	12
Gambar 2.2. Bentuk Fisik <i>Mach3 Board</i> . ....	15
Gambar 2.3. Layar Utama <i>Mach3</i> .....	16
Gambar 2.4. Bentuk Fisik Motor <i>Stepper</i> . ....	17
Gambar 2.5. Ilustrasi Motor <i>Stepper Permanent Magnet (PM)</i> .....	19
Gambar 2.6. Ilustrasi Motor <i>Stepper Variabel Reluctance (VR)</i> .....	20
Gambar 2.7. Konstruksi Motor <i>Stepper Tipe Hybrid</i> .....	22
Gambar 2.8. <i>Driver</i> Motor <i>Stepper TB6600</i> . ....	23
Gambar 2.9. Keluaran flux dari laser semiikonduktor terhadap arus laser .....	30
Gambar 2.10. Struktur Laser Penguatan .....	31
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian .....	35
Gambar 3.2. Desain Rangka CNC Laser .....	39
Gambar 3.3. Desain kontroler CNC.....	41
Gambar 3.4. Rangkaian Keluaran Laser .....	42
Gambar 4.1. Realisasi CNC Laser .....	47
Gambar 4.2. Realisasi Mekanik CNC Laser .....	48
Gambar 4.3. Pemasangan Motor <i>Stepper</i> Sumbu X dan Z .....	48
Gambar 4.4. Pemasangan Motor <i>Stepper</i> Sumbu Y.....	49
Gambar 4.5. Teknik konversi menggunakan <i>lead screw</i> .....	50
Gambar 4.6. Teknik konversi menggunakan <i>timing belt</i> .....	51



Gambar 4.7.	Realisasi Rangkaian Elektrik CNC Laser .....	51
Gambar 4.8.	Pengaturan masukan pada kontroler <i>Mach3</i> .....	52
Gambar 4.9.	Keadaan <i>reset</i> pada perangkat lunak <i>Mach3</i> .....	53
Gambar 4.10.	Pengaturan keluaran motor pada perangkat lunak <i>Mach3</i> .....	54
Gambar 4.11.	Pengaturan <i>spindle</i> pada perangkat lunak <i>Mach3</i> .....	54
Gambar 4.12.	Pengaturan <i>Motor Tuning</i> pada sumbu X.....	56
Gambar 4.13.	Pengaturan <i>Motor Tuning</i> pada sumbu Y.....	57
Gambar 4.14.	Pengaturan <i>Motor Tuning</i> pada sumbu Z.....	58
Gambar 4.15.	Grafik pengaruh <i>Feedrate</i> terhadap Waktu Pemotongan.....	60
Gambar 4.16.	Grafik pengaruh <i>Feedrate</i> terhadap Hasil Pemotongan pada Jarak Laser 5 mm (a) Kedalaman (b) Lebar.....	63
Gambar 4.17.	Proses pemotongan akrilik dengan jarak laser terhadap akrilik sejauh 5 mm .....	64
Gambar 4.18.	Grafik pengaruh <i>Feedrate</i> terhadap Hasil Pemotongan pada Jarak Laser 10 mm (a) Kedalaman (b) Lebar.....	65
Gambar 4.19.	Proses pemotongan akrilik dengan jarak laser terhadap akrilik sejauh 10 mm .....	67
Gambar 4.20.	Grafik pengaruh <i>Feedrate</i> terhadap Hasil Pemotongan pada Jarak Laser 15 mm (a) Kedalaman (b) Lebar.....	67
Gambar 4.21.	Proses pemotongan akrilik dengan jarak laser terhadap akrilik sejauh 15 mm .....	69
Gambar 4.22.	Grafik pengaruh <i>Feedrate</i> terhadap Hasil Pemotongan pada Jarak Laser 20 mm (a) Kedalaman (b) Lebar.....	70
Gambar 4.23.	Proses pemotongan akrilik dengan jarak laser terhadap akrilik sejauh 20 mm .....	71
Gambar 4.24.	Grafik pengaruh <i>Feedrate</i> terhadap Hasil Pemotongan pada Jarak Laser 25 mm. ....	72
Gambar 4.25.	Proses pemotongan akrilik dengan jarak laser terhadap akrilik sejauh 25 mm .....	73
Gambar 4.26.	Grafik pengaruh Jarak Perpindahan Laser terhadap Waktu. ....	75

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Pemrograman Kode G .....	25
Tabel 2.2. Pemrograman Kode M.....	26
Tabel 2.3. Pemrograman Kode Lain .....	27
Tabel 3.1. Data pengujian <i>feedrate</i> terhadap waktu pada jarak perpindahan 250 mm .....	44
Tabel 3.2. Data pengujian <i>feedrate</i> terhadap hasil pemotongan pada akrilik 3 mm .....	45
Tabel 3.3. Data pengujian jarak perpindahan terhadap waktu pada <i>feedrate</i> 55 mm/menit.....	46
Tabel 3.4. Data pengujian akurasi.....	46
Tabel 3.5. Data pengujian presisi.....	46
Tabel 4. 1. Program 1 .....	59
Tabel 4.2. Data pengujian <i>feedrate</i> terhadap waktu pemotongan pada jarak perpindahan laser 250 mm.....	59
Tabel 4.3. Program 2.....	61
Tabel 4.4. Data pengujian <i>feedrate</i> terhadap hasil pemotongan pada akrilik 3 mm.....	62
Tabel 4.5. Program 3.....	74
Tabel 4.6. Data pengaruh Jarak Perpindahan Laser terhadap Waktu .....	74
Tabel 4.7. Data pengujian akurasi.....	75
Tabel 4.8. Data pengujian presisi.....	76

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Laboratorium di era modern saat ini memiliki perkembangan yang sangat pesat terkhususnya di bidang teknologi manufaktur. Fasilitas laboratorium lambat laun akan semakin lengkap dan canggih termasuk alat laboratorium. Namun, dengan sistem pemerintah terkini yang akan membatasi penyediaan alat laboratorium secara impor, tentunya pengelola laboratorium akan terkena dampak dan memiliki keterbatasan alat karena sebagian besar alat laboratorium di instansi pendidikan disediakan secara impor. Hal ini tentunya menjadi peluang besar untuk peneliti dalam mengembangkan alat laboratorium menggunakan produk dalam negeri.

Peralatan laboratorium adalah mesin, perkakas, perlengkapan, dan alat-alat kerja lain yang secara kusus dipergunakan untuk pengujian, kalibrasi, dan/atau produksi dalam skala terbatas (Raharjo, 2017). 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 yang diolah sedemikian rupa agar memiliki fungsi sesuai yang dibutuhkan 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 dan pengukur otomatis, biasa kita sebut dengan *Computer Numerical Control (CNC)* laser. Perkembangan mesin CNC saat ini merupakan pembaruan mesin perkakas yang telah ada sebelumnya yang kurang efektif dari segi waktu dan biaya. Penggunaan mesin perkakas sebelumnya yakni mesin *router* pada awalnya dibuat untuk memotong bentuk profil langsung pada kayu secara manual (Ma'arif dkk., 2021).

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 dan 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.

Pada penelitian Hasibuan dkk. (2019), dirancang suatu alat CNC sederhana yang dapat digunakan untuk menggambar suatu pola gambar pada jalur *Printed Circuit Board (PCB)* secara otomatis. Desain yang telah digambar menggunakan suatu perangkat lunak (*software*) pada *Personal Computer (PC)* akan dikonversi dalam bentuk *Geometry Code (G-Code)* lalu data akan dikirim ke penggerak (*driver*) motor *stepper* yang akan digunakan untuk menggerakkan motor *stepper* agar bergerak membentuk pola pada bidang gambar sesuai desain. Sistem kerja teknologi CNC ini akan lebih sinkron antara komputer dan mekanik, sehingga bila dibandingkan dengan mesin perkakas yang sejenis, maka mesin perkakas CNC lebih teliti, lebih tepat, lebih fleksibel dan cocok untuk produksi dalam skala besar.

Pada penelitian Jufrizaldy dkk. (2020), mereka juga membuat mesin CNC *milling* untuk pembuatan desain tata letak (*layout*) PCB. Mesin CNC *milling* merupakan mesin potong berbasis komputer yang dapat menjalankan proses secara otomatis pada berbagai macam perintah yang telah diprogram ke dalam perangkat lunak menggunakan program *G-Code* sebagai pengontrol mesin CNC. Mikrokontroler digunakan untuk menerima *G-Code* yang dikirim dari PC yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan motor *stepper*. Motor *stepper* merupakan jenis

motor yang putarannya berdasarkan langkah diskrit. Perancangan ini menggunakan 3 buah motor *stepper* dimana setiap motor *stepper* berfungsi untuk menggerakkan sumbu X, Y dan Z. Poros putaran (*spindle*) digunakan sebagai pengendali mata bor yang berfungsi untuk mengukir *layout* pada PCB. Mesin CNC *milling* yang dikembangkan ini merupakan mesin CNC yang dikontrol dengan menggunakan *software G-code Reference Block Library (GRBL)* melalui perangkat komputer. Mekanisme kerja mesin CNC *milling* ini adalah melakukan pembuatan pola benda kerja yang didesain dengan bantuan perangkat lunak *diptrace* yang digunakan untuk otomatisasi pengambilan skema elektronik dan tata letak PCB.

Penelitian lainnya juga dilakukan oleh Ma'arif dkk. (2021), mereka membuat mesin CNC *router* yang merupakan penggabungan antara teknologi CNC dan mesin *router*. CNC difungsikan untuk mengontrol pergerakan proses pemotongan dan *router* yang difungsikan sebagai pemutar alat potong. Mesin ini memanfaatkan putaran mata potong yang berputar pada porosnya dan bergerak berdasarkan sumbu X, Y, dan Z untuk melakukan pekerjaan menggali, mengukir dan memotong. Penelitian ini bertujuan untuk membuat produk yang mempunyai nilai jual yang dapat bersaing dan kualitas dapat diterima dengan kegunaan membuat produk. Namun, kelemahan dari penelitian ini yaitu belum adanya mode pengaturan pada kecepatan *spindle router* dan belum adanya pergerakan otomatis pada sumbu Z ketika mesin tiba tiba dalam kondisi *off* serta dimensi kerja yang masih minim.

Sistem CNC juga dikembangkan oleh Yanto dkk. (2021), mereka membuat mesin CNC *Laser Enggraver* yang bertujuan untuk menggrafir dan mengukir media kerja menggunakan laser. Dimensi total dari mesin CNC *Laser Enggraver* ini adalah 585 mm x 533 mm x 350 mm dengan berat total sekitar 22 kg. Dirancang memiliki ruang kerja 310 mm x 390 mm pada bidang X-Y dengan tinggi laser masuk arah Z-Axis dapat disesuaikan 10 mm hingga 60 mm di atas ukiran meja. Namun, penelitian ini juga hanya sebatas menggrafir media kerja menggunakan laser serta dimensi kerja yang masih minim.

Muchlis dkk. (2021) juga membuat penelitian mengenai pembuatan CNC laser dengan metode *Design for Assembly*. Pada penelitian tersebut, dijelaskan bahwa CNC laser tersebut digunakan untuk mengukir atau mencetak tulisan secara otomatis berdasarkan media yang digunakan, seperti akrilik dan kayu.

Terdapat pula penelitian dalam pembuatan mesin *CNC laser cutting* yang bisa digunakan untuk memotong. Penelitian tersebut dilakukan oleh Salam dkk. (2020b). Mesin *CNC Laser Cutting* merupakan penggabungan teknologi *Computer Numerical Control* (CNC) dan laser, pemotong yang berupa laser mampu memotong bentuk-bentuk lembaran kayu atau material lunak lainnya yang memiliki bentuk rumit dan membutuhkan ketelitian. Pergerakan dan lintasan laser untuk sumbu X, Y, dan Z berasal dari program komputer berdasarkan gambar ataupun desain kontur lintasan yang telah dibuat. 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. Namun, dimensi tersebut masih tergolong terbatas untuk pemotongan media akrilik maupun triplek lembaran yang memiliki ukuran 1000 mm x 2000 mm per lembar.

Bagian mesin CNC pada umumnya terdapat sistem mekanik dan sistem elektrik yang bisa disebut juga kontroler mesin yang menggunakan *Human Machine Interface* (HMI) dengan harga yang mahal. Salah satu perangkat lunak yang digunakan untuk mengontrol mesin CNC tersebut adalah *Mach3* berbasis PC dengan harga yang murah dan fungsi yang sama perangkat lunak ini tidak jauh dengan keunggulan panel HMI tersebut. Untuk mengoperasikan mesin dengan perangkat lunak ini juga tidak begitu sulit. Cara pengoperasiannya dikontrol dengan memasukkan data berupa perintah dengan kode angka, huruf dan simbol menjadi bentuk gerakan mesin. Masukan 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 disebutkan, dalam penelitian ini bermaksud untuk mengembangkan mesin CNC yaitu membuat mesin CNC laser yang dapat digunakan untuk memotong ataupun menggrafir dengan dimensi bidang kerja yang cukup besar yakni 1 m x 2 m menggunakan sistem kontrol dan perangkat lunak *Mach3* berbasis PC yang memudahkan operator untuk mengoperasikannya serta material kerjanya dikhususkan untuk akrilik.

## **B. Rumusan Masalah**

Beberapa hal yang dianggap sangat krusial dalam pembuatan mesin CNC laser adalah masalah terkait kecepatan dan kepresisian mesin. Untuk itu rumusan masalah pada penelitian dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem CNC laser untuk aplikasi mesin *cutting* otomatis?
2. Bagaimana sistem kontrol mesin CNC laser untuk aplikasi mesin *cutting* otomatis?
3. Bagaimana merealisasikan hasil potongan dari mesin CNC laser dengan tingkat ketelitian yang tinggi?
4. Bagaimana merealisasikan mesin CNC laser yang mampu memotong bidang kerja berupa akrilik lembaran dengan dimensi 1000 mm x 2000 mm?

## **C. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Merealisasikan mesin CNC menggunakan mata potong berupa laser.
2. Merealisasikan mesin CNC laser menggunakan *software Mach3* yang akan dikontrol menggunakan *Personal Computer (PC)*.
3. Menghasilkan potongan produk dari mesin CNC laser dengan ketelitian yang tinggi.
4. Menghasilkan mesin CNC laser yang mampu memotong akrilik lembaran dengan dimensi 1000 mm x 2000 mm.

#### **D. Batasan Masalah**

Masalah pada penelitian ini dibatasi oleh beberapa aspek, yaitu

1. Menggunakan mata potong berupa laser.
2. Menggunakan mikrokontroler *Mach3*.
3. Menggunakan 4 motor *stepper*, yaitu 1 motor *stepper* digunakan untuk menggerakkan di sumbu x (bergerak kanan dan kiri), 2 motor *stepper* digunakan untuk menggerakkan di sumbu y (bergerak maju dan mundur), dan 1 motor *stepper* digunakan untuk menggerakkan di sumbu z (bergerak naik dan turun).
4. Memotong akrilik dengan ketebalan 3 mm dan dimensi 1000 mm x 2000 mm.

#### **E. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini memiliki manfaat bagi dunia industri maupun laboratorium, contohnya laboratorium yang terdapat di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung untuk menunjang kebutuhan mahasiswa dalam melakukan sistem manufakturing.



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Penelitian Terkait**

Mesin CNC adalah suatu sistem yang pada dasarnya mengubah bahasa program *Geometry Code (G-Code)* menjadi gerakan-gerakan axis pada mesin. Pada rangkaian sistem CNC terdapat komputer yang berfungsi mengubah karakter *G-Code* ke bahasa mesin yang kemudian diproses dan dikirim kepada masing-masing penggerak (*driver*) motor dalam bentuk sinyal, baik sinyal analog maupun digital. CNC beragam jenis dilihat dari media yang digunakan, yaitu *CNC router* (media mata bor), *CNC plasma* (media laser atau api), *CNC water* (media air) dan lain-lain. CNC sudah sangat banyak digunakan di industri besar dan merupakan suatu alat yang wajib ada di dalam industri manufaktur baik dengan alasan kepresisian atau dengan efisiensi produksi (Yanto dkk., 2021).

Mesin CNC merupakan mesin yang penggunaannya menggunakan PC dengan memanfaatkan bahasa numerik (informasi pemesanan dengan kode angka, huruf dan gambar) sesuai aturan yang sudah ada. Pada dasarnya mesin CNC merupakan instrumen mesin terprogram yang bekerja bergantung pada desain benda kerja yang pertama kali direncanakan melalui produk seperti AutoCAD. Sehingga disimpulkan bahwa mesin CNC merupakan mesin perkakas otomatis yang dioperasikan melalui komputer dengan menggunakan masukan berupa numerik dan mesin ini digunakan dalam proses manufaktur yang menggunakan kontrol terkomputerisasi dan peralatan mesin.

Mesin *router* adalah mesin yang digunakan untuk memberikan sentuhan seni dalam profil yang dapat berbentuk melengkung, lurus atau lingkaran yang baik

dan indah. Mesin *router* pada awalnya dibuat untuk memotong bentuk profil langsung pada kayu secara manual. Penggunaan pisau pengiris dapat diubah sesuai dengan bahan yang akan digunakan digunakan. Mesin *router* selain membuat profil dan menghias benda kerja kayu, juga dapat digunakan untuk membentuk sisi tebal kayu, membuat alur, membuat tisu, membuat pelapis malam (*formika*), membuat alur dan berbagai karya lainnya dengan peralatan yang luar biasa. Selain untuk profil mesin *router* digunakan sebagai *spindle* utama pada mesin CNC.

Mesin CNC *router* adalah pergabungan teknologi CNC dan mesin *router*, CNC difungsikan untuk mengontrol pergerakan proses pemotongan dan *router* yang difungsikan sebagai pemutar alat potong, mesin ini memanfaatkan putaran mata potong yang berputar pada sumbunya untuk melakukan pekerjaan menggali, mengukir dan memotong.

Pada penelitian ini, tahap pengujian dilakukan menggunakan 3 material, yaitu *aluminium composite panel* (ACP), akrilik, dan kayu. Hasil yang diperoleh menunjukkan kepresisian dari tiap sumbu X, Y, dan Z sesuai dengan nilai toleransi yang diinginkan yaitu masing-masing 0,01 mm dan kontur ukiran pada benda kerja tidak menunjukkan penyimpangan (Ma'arif dkk., 2021).

Pada penelitian Hasibuan dkk. (2019), dirancang suatu alat CNC sederhana yang dapat digunakan untuk menggambar suatu pola gambar pada jalur *Printed Circuit Board* (PCB) secara otomatis. Desain yang telah digambar melalui *personal computer* (PC) akan dikonversi dalam bentuk *G-Code*, dari data yang diterima oleh penggerak (*driver*) motor *stepper* lalu data akan digunakan sebagai penggerak motor *stepper* dan membentuk pola pada bidang gambar sesuai desain. Sistem kerja teknologi CNC ini akan lebih sinkron antara computer dan mekanik, sehingga bila dibandingkan dengan mesin perkakas yang sejenis, maka mesin perkakas CNC lebih teliti, lebih tepat, lebih fleksibel dan cocok untuk produksi skala besar.

Penelitian dengan penerapan pembuatan desain tata letak (*layout*) PCB juga dilakukan oleh Jufrizal dy dkk. (2020) yaitu pembuatan mesin CNC *milling* yang

digunakan untuk pembuatan *layout* PCB. Mesin CNC *milling* pada penelitian ini merupakan mesin yang cara kerjanya menggrafir papan PCB. Prinsip kerja mesin *milling* adalah gerak utama berputar dilakukan oleh alat potong, sedangkan gerak pemakanannya dilakukan oleh benda kerja yang terpasang pada meja kerja. Arah gerakan persumbuan mesin CNC *milling* yaitu sumbu X untuk arah memanjang meja, sumbu Y untuk arah melintang meja, dan sumbu Z untuk vertikal *spindle*. Mesin CNC *milling* yang dikembangkan ini merupakan mesin CNC yang dikontrol dengan menggunakan perangkat komputer. Mekanisme kerja mesin CNC *milling* ini adalah dengan melakukan pembuatan pola benda kerja yang didesain dengan bantuan perangkat lunak *diptrace*. Proses pengerjaan *layout* dilakukan menggunakan material PCB. Benda kerja ini memiliki dimensi 170 mm x 150 mm dengan ketebalan 2 mm.

Metode grafir yang menggunakan mesin CNC juga terdapat pada penelitian Yanto dkk. (2021). Pada penelitian ini, proses menggrafir bidang kerja bukan menggunakan bor, melainkan menggunakan laser. Bidang kerja yang digunakan berupa kayu. Hasil desain dari mesin ukir laser CNC terdiri dari 5 unit yaitu unit modul ukir laser, unit sumbu Z, unit sumbu X, unit sumbu Y dan unit meja ukiran yang dipasang dengan sistem baut. Mesin ukir laser CNC ini dirancang memiliki ruang kerja 310 mm x 390 mm pada bidang X-Y dengan tinggi mata laser arah sumbu Z dapat disesuaikan 10 mm hingga 60 mm di atas ukiran meja. Dimensi total dari mesin ukir laser CNC ini adalah 585 mm x 533 mm x 350 mm dengan berat total sekitar 22 kg.

Penelitian lainnya juga dilakukan oleh Muchlis dkk. (2021). Mereka membuat mesin CNC laser dengan metode *Design for Assembly* (DFA). DFA digunakan untuk mengetahui gerak motor *stepper* yang akurat ke arah X dan Y pada mesin CNC laser. Alat ini nantinya akan menghasilkan cahaya laser yang dapat memberikan keluaran seperti kaligrafi, ukiran dan gambar. Mesin CNC laser ini akan dirancang sesuai dengan apa yang ada pada skema *wiring* dengan bantuan motor *stepper*, maka laser akan bergerak dengan objek yang telah ditentukan sebelumnya melalui *software*, modul *driver* laser dan motor *stepper* dibuat dengan

bantuan arduino nano yang digabungkan dengan modul motor *stepper*, penggerak motor *stepper* menggunakan servo *driver*.

Pengujian laser menggunakan laser dioda 15 watt yang di sambungkan dengan arduino nano dalam bentuk CNC *shield*, kemudian *software GRBL* mengirim *G-Code* ke arduino nano, arduino nano menerjemahkan hasil *G-Code* 26 agar laser tersebut dapat memancarkan sinar sesuai yang diinginkan oleh pengguna.

Mesin ukir laser dilengkapi dengan *emergency stop*. Perangkat elektronika ini memiliki fungsi untuk mengurangi kerusakan pada mesin CNC, apabila sistem mengalami kendala (*error*) dari pergerakan mesin yang membahayakan. Pengujian dilakukan pada material *plywood* 3 mm untuk pemotongan dan pengukiran dengan berbagai ukuran dan pola gambar. Dari hasil pengujian yang didapatkan bahwa mesin ukir laser CNC dapat bekerja dengan hasil yang sangat baik (Muchlis dkk., 2021).

Selain itu terdapat juga penelitian tentang mesin CNC pemotongan laser yang dilakukan oleh Salam dkk. (2020b). Mereka membuat mesin CNC pemotongan laser berdimensi mesin 900 mm x 900 mm x 950 mm menggunakan jenis laser *diode* memiliki panjang gelombang 405 nm dan daya 2500 mW dengan ketelitian pemotongan 0,01 mm.

## **B. Computer Numerically Controlled (CNC)**

*Computer Numerical Control* (CNC) adalah proses yang dibantu komputer untuk mengendalikan mesin keperluan umum dari instruksi yang dihasilkan oleh prosesor dan disimpan dalam sistem memori atau media penyimpanan (*tape, disk, chip, dll.*) untuk penggunaan saat ini maupun masa depan. Kontrol Numerik memiliki arti persis seperti yang tersirat dalam istilah kontrol dengan angka. Pengendalian mesin dengan perintah numerik telah membawa revolusi di bidang manufaktur. CNC dapat disesuaikan dengan segala jenis mesin atau proses yang memerlukan arahan kecerdasan manusia. Teks ini berhubungan langsung dengan Pusat Penggilingan CNC, Pusat Pembubutan, Mesin Bor, dan Mesin Gerinda.

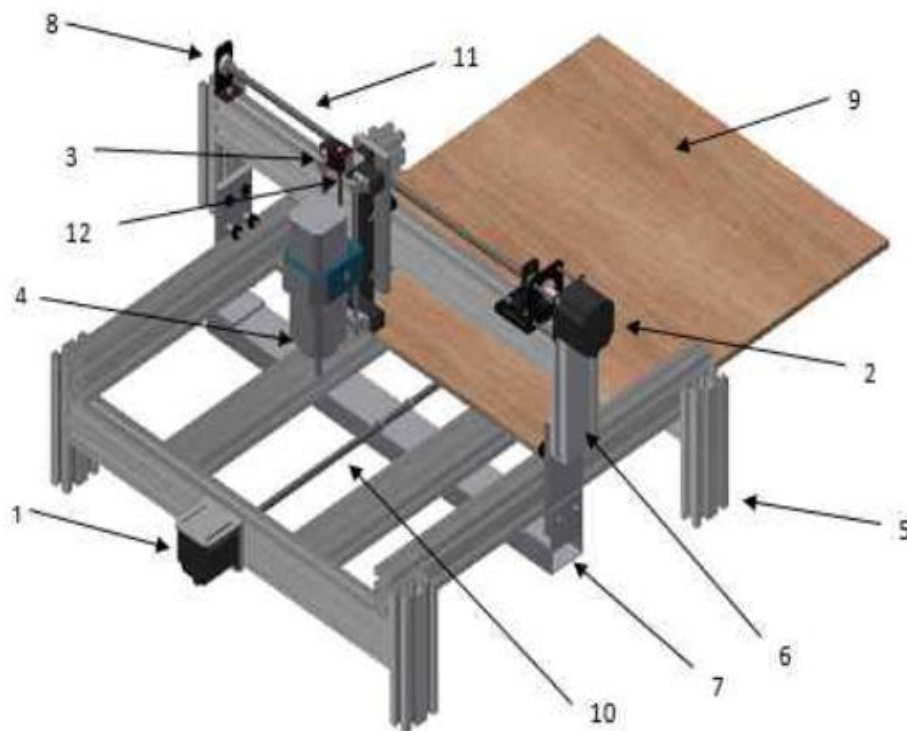
CNC adalah bentuk spesifik dari sistem kendali dimana posisi adalah variabel utama yang dikendalikan. Nilai numerik, yang mewakili posisi alat yang diinginkan dan informasi simbolis yang sesuai dengan fungsi sekunder, dicatat dalam beberapa bentuk (*tape, disk, jaringan, dll.*) dimana informasi tersebut dapat disimpan dan direvisi tanpa batas waktu. Hard Drive, Tape Reader, dan konverter lainnya mengubah informasi ini menjadi sinyal yang pada akhirnya mengoperasikan mekanisme servo pada setiap sumbu mesin yang gerakannya akan dikontrol.

CNC awalnya diterapkan pada mesin pengerjaan logam: Pabrik, Bor, Pengeboran Mesin, dan Punch Press. Ini telah diperluas ke bidang pengerjaan logam lainnya termasuk aplikasi di bidang Robotika, pada mesin pemotong, pembengkok tabung, penggiling dari banyak jenis, pemotong roda gigi, mesin broaching, permesinan elektromekanis, pemotongan api, dan pengelasan. CNC juga digunakan untuk inspeksi, penyusunan sistem, mesin perakitan elektronik, proses pemotongan dan pengikatan laser, sistem pengujian otomatis, mesin cetak, mesin pengerjaan kayu, fotografi, dan peralatan pemotongan garmen. Saat ini, mikroprosesor 32 dan 64-bit yang digabungkan langsung dengan sistem kendali mesin produksi memperluas aplikasi dan definisi dasar kontrol numerik.

Tujuan dasar utama penerapan CNC pada operasi pengerjaan logam adalah untuk mengurangi biaya produksi suku cadang mesin. Tujuan ini dicapai dengan mengurangi waktu pemrograman CNC, meningkatkan kemampuan operasional sistem *Numeric Control* yang ada, dan menjadikan seluruh proses pemesinan lebih mudah digunakan. CNC juga mencapai tujuan ini dengan mengurangi waktu pemesinan, biaya pemasangan dan penyimpanan perkakas, meningkatkan masa pakai pemotong, dan menurunkan keterampilan yang diperlukan untuk memproduksi komponen mesin presisi secara otomatis. Keuntungan lainnya mencakup pengurangan waktu penyiapan secara signifikan, peningkatan keseragaman produk, dan pengurangan biaya lainnya secara keseluruhan. CNC telah memungkinkan estimasi proses produksi yang akurat. Secara historis, CNC memungkinkan penjadwalan bengkel yang lebih efisien, prediksi biaya yang tepat, pemanfaatan fasilitas yang lebih tinggi, dan pengembalian investasi

peralatan yang lebih cepat dibandingkan dengan teknik kontrol mesin yang kurang canggih atau operasi manual (Madison, 1996).

Pada dasarnya mesin CNC merupakan instrumen mesin terprogram yang bekerja bergantung pada desain benda kerja yang pertama kali direncanakan melalui produk seperti *AutoCAD*. Sebuah sistem CNC ini terdiri atas tiga komponen dasar, yaitu program yang berisi perintah pengerjaan, unit pengendali mesin *machine control unit* (MCU) dan peralatan proses (Jufrizaldy dkk., 2020). Sehingga disimpulkan bahwa mesin CNC merupakan mesin perkakas otomatis yang dioperasikan melalui komputer yang menggunakan masukan berupa numerik dan mesin ini digunakan dalam proses manufaktur yang menggunakan kontrol terkomputerisasi dan peralatan mesin (Ma'arif dkk., 2021). Rancangan mesin CNC dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Keterangan:

- |                  |                                 |
|------------------|---------------------------------|
| 1. Motor Sumbu Y | 7. Penghubung Tiang dan Sumbu Y |
| 2. Motor Sumbu X | 8. Dudukan Bearing              |
| 3. Motor Sumbu Z | 9. Meja Kerja                   |
| 4. Router        | 10. Poros Ulir Sumbu Y          |
| 5. Rangka Bawah  | 11. Poros Ulir Sumbu X          |
| 6. Tiang         | 12. Poros Ulir Sumbu Z          |

Gambar 2.1. Rancangan Mesin CNC 3-Axis (Salam dkk., 2020a).

CNC adalah suatu sistem yang pada dasarnya mengubah bahasa program (*G-Code*) menjadi gerakan-gerakan axis pada mesin. Pada rangkaian sistem CNC terdapat komputer yang berfungsi mengubah karakter *G-Code* ke bahasa mesin yang kemudian diproses dan dikirim kepada masing-masing *driver* motor dalam bentuk sinyal, baik sinyal analog maupun digital (Harrizal dkk., 2017).

Mesin CNC sendiri dapat diartikan sebagai suatu mesin perkakas yang pengoperasiannya dikendalikan melalui program yang diakses dengan komputer. Mesin ini dilengkapi dengan *digital signal processing* (DSP) dalam memotong atau mengukir bahan. Pengoperasian mesin dapat dilakukan secara otomatis dengan komputer dan manual dengan layar monitor *portable*. Mesin ini memiliki 3 macam fungsi, yaitu untuk memotong, menggrafir, dan memberi tanda marka (Salam dkk., 2020b).

Proses mesin CNC diawali dari mendesainnya sampai dengan menghasilkan sebuah benda kerja dalam bentuk CNC, *software* simulasi CNC yang digunakan, baik itu *software* yang mampu berdiri sendiri untuk proses kombinasi berbagai *software* lain hingga mesin CNC dapat berjalan menggunakan perangkat atau *software* komputer. Mesin CNC memiliki kontroler yang bisa mengubah karakter *G-Code* ke bahasa yang bisa dikenal oleh mesin kemudian diproses dan dikirim kepada masing-masing *driver* motor stepper dalam bentuk sinyal digital ataupun analog (Muchlis dkk., 2021).

Mesin CNC ini termasuk mesin yang menggunakan sistem *close loop*. Apabila ada kesalahan pada mesin baik dari program yang dimasukkan ataupun dari sistem elektrikalnya mesin tersebut akan mengeluarkan kode alarm dan proses yang sedang berjalan akan terhenti. Sistem kontrol numerik pada mesin CNC dapat berjalan dikarenakan adanya seperangkat komponen sistem kontrol yang mendukung operasional mesin seperti motor *stepper*, *driver* motor, *breakout board control*, catu daya dan lain-lain. Semua komponen tersebut selanjutnya digabungkan sedemikian rupa dengan kabel-kabel sehingga membentuk perangkat elektronik tertentu (Harrizal dkk., 2017).

Sistem kerja teknologi CNC ini akan lebih sinkron antara komputer dan mekanik, sehingga bila dibandingkan dengan mesin perkakas yang sejenis maka mesin perkakas CNC lebih teliti, lebih tepat, lebih fleksibel dan cocok untuk produksi massal. Mesin CNC memiliki dua atau lebih arah gerakan tool yang disebut dengan sumbu atau axis. Gerakan pada axis antara lain *linier* (yang merupakan garis lurus) atau gerakan *circular* (yang merupakan lintasan melingkar). Umumnya, sumbu yang terdapat pada gerakan linier adalah X, Y dan Z sedangkan nama axis pada gerakan *circular* adalah A, B dan C. Proses sinkronisasi gerakan pada sumbu gerak tersebut diperlukan suatu sistem interpolator yang secara khusus membagi gerakan tiap axis berdasarkan perintah gerakan global yang diwujudkan dalam bentuk sinyal perintah gerakan ke sistem penggerak (Amala dan Widyanto, 2014).

CNC memiliki beragam jenis dilihat dari media yang digunakan, yaitu CNC *router* (media mata bor), CNC *plasma* (media laser atau api), CNC *water* (media air) dan lain-lain (Yanto dkk., 2021). Mesin CNC *router* merupakan penggabungan teknologi CNC dan mesin *router*. Router ini difungsikan sebagai media pemutar alat potong, sehingga mesin ini memanfaatkan putaran mata potong yang berputar pada porosnya dan bergerak pada sumbu X, Y dan Z untuk melakukan pekerjaan menggali, mengukir dan memotong (Ma'arif dkk., 2021). Mesin CNC *water* merupakan penggabungan teknologi CNC dengan mesin *water jet cutting*. Prinsip dasar sistem *water jet* ini adalah pemotongan menggunakan air dengan mengkonversi air yang bertekanan rendah menjadi air yang bertekanan tinggi (Suheri dkk., 2019).

Mesin CNC plasma atau bisa juga disebut dengan mesin CNC laser *cutting* merupakan penggabungan teknologi CNC dan laser, pemotong yang berupa laser mampu memotong bentuk-bentuk lembaran kayu atau material lunak lainnya yang memiliki bentuk rumit dan membutuhkan ketelitian dalam pemakanan. Pergerakan dan lintasan pemotongan untuk sumbu X, Y, dan Z berasal dari program komputer berdasarkan gambar ataupun desain kontur lintasan yang telah dibuat (Salam dkk., 2020b).



### C. *Mach3*

*Mach3 board* adalah kontroler yang digunakan sebagai penghubung antara komputer dengan aktuator berupa sinyal masukan atau keluaran. Perangkat lunak yang digunakan yaitu *mach3* berfungsi untuk melakukan pemrosesan dan pemantauan mesin CNC 3 axis. Komunikasi yang digunakan *mach3 board* yaitu DB25 atau komunikasi paralel yang memiliki kelebihan dalam kecepatan komunikasi karena komunikasi paralel dapat mengirimkan sinyal data sekaligus menerima sinyal data dalam waktu yang bersamaan sehingga dapat dipastikan tingkat akurasi secara komunikasi (Nugroho dkk., 2020). Bentuk fisik *Mach3 Board* dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.

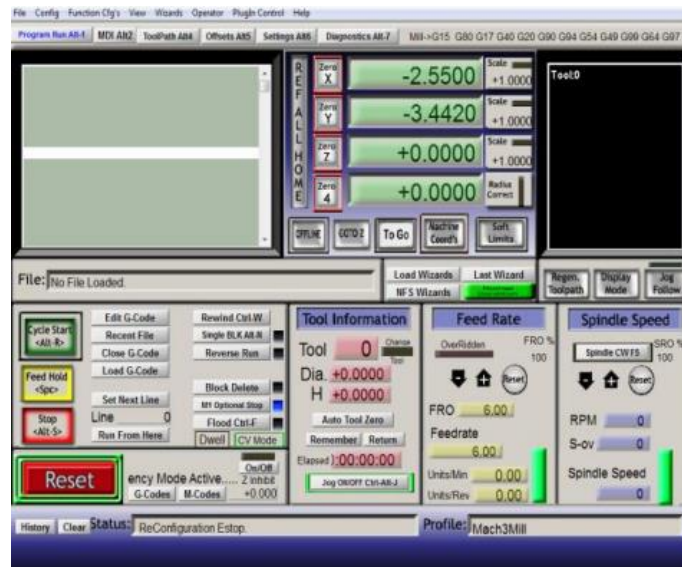


Gambar 2.2. Bentuk Fisik *Mach3 Board* (Ridwan dan Widodo, 2023).

Perangkat lunak pengontrol *Mach3* merupakan pengontrol CNC perangkat lunak sumber terbuka yang mengontrol mesin CNC tanpa bergantung pada merek dan model mesin CNC itu sendiri. Mesin CNC dijalankan dengan menggunakan perangkat lunak *Mach3* dan dikendalikan oleh pengontrol *Mach3*, yang membantu mengubah kode G menjadi sinyal digital proses fabrikasi untuk operasi CNC. Perangkat lunak pengontrol *Mach3* digunakan sebagai perantara untuk mendukung fungsi CNC. Gerakan tiga sumbu dikendalikan dengan bantuan pengontrol *Mach3* dan terintegrasi dengan perangkat lunak *Mach3* kemudian terhubung ke *driver* motor untuk menggerakkan motor stepper dengan mengontrol gerakan tiga sumbu (Elmiawan dkk., 2022).

*Mach3* adalah perangkat lunak utama yang digunakan pada mesin CNC. *Mach3* akan membantu komputer menyampaikan sinyal informasi dan perintah kepada

mesin dalam bentuk kode. Tampilan awal perangkat lunak *Mach3* terlihat pada Gambar 2.3. berikut.



Gambar 2.3. Layar Utama *Mach3* (Julian dkk., 2023).

Terdapat beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan pada perangkat lunak *Mach3* untuk menentukan performa mesin.

### 1. *Select Native Unit*

Pada menu utama *Mach3* terdapat menu “*config*” yang memiliki sub menu “*Select Native Unit*”. Menu tersebut dipilih untuk mengatur standar satuan ukuran yang akan digunakan.

### 2. *Ports and Pins – Motor Outputs*

*Motor outputs* pada menu *ports and pins* berfungsi sebagai pengatur perantara *Mach3* dalam mengendalikan aktuator motor *stepper* yang bergerak pada tiga sumbu.

### 3. *Ports and Pins - Input Signals*

Pada rangkaian kontrol mesin CNC ini, *limit switch* dan *e-stop* terhubung dan memberikan sinyal masukan kepada perangkat lunak antar muka *Mach3* yang selanjutnya akan memberi perintah lanjutan kepada keluaran motor. Khusus untuk komponen *limit switch*, selain sebagai komponen keamanan, *limit switch* juga dapat dijadikan sebagai batas jangkauan maksimal dari masing-masing sumbu pada mesin CNC.

#### 4. *Motor Tuning*

*Motor Tuning* berfungsi untuk mengatur performa motor yang dibutuhkan. Ada beberapa poin yang perlu diperhatikan dalam pengaturan *Motor Tuning* diantaranya adalah *steps per*, *velocity*, dan *acceleration* (Harrizal dkk., 2017).

#### D. *Motor Stepper*

Motor *stepper* adalah perangkat elektromekanis yang bekerja dengan mengubah pulsa elektronis menjadi gerakan mekanis diskrit. Motor *stepper* bergerak berdasarkan urutan pulsa yang diberikan kepada motor. Karena itu, untuk menggerakkan motor *stepper* diperlukan pengendali motor *stepper* yang membangkitkan pulsa-pulsa periodik (Soedjarwanto dkk., 2021). 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 (Patonra dkk., 2020).

Motor *stepper* adalah salah jenis motor yang putarannya berdasarkan langkah (*step*). Motor *stepper* banyak digunakan dalam aplikasi industri seperti CNC, lengan robot, pemindai, *printer* dan yang terbaru adalah 3D printer, karena kehandalan dan kemampuan kontrol *open loop*. Bentuk fisik motor *stepper* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Bentuk Fisik Motor *Stepper* (Sendari dkk., 2021).

Gambar 2.4 merupakan bentuk fisik dari motor *stepper*. Motor *stepper* memiliki karakter yang lebih baik dibanding motor DC, seperti sudut rotasi motor proporsional dengan pulsa masukan sehingga lebih mudah diatur, motor dapat

langsung memberikan torsi penuh pada saat mulai bergerak, posisi dan pergerakan repetisinya dapat ditentukan secara presisi, memiliki respon yang sangat baik terhadap *start*, *stop* dan berbalik perputaran, sangat realibel karena tidak adanya *brush* yang bersentuhan dengan rotor seperti pada motor DC, dapat menghasilkan perputaran yang lambat sehingga beban dapat digabungkan langsung ke porosnya, serta frekuensi perputaran dapat ditentukan secara bebas, mudah pada range yang luas (Suryati dkk., 2019).

Motor *stepper* adalah motor elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dan berputar sejumlah derajat tertentu sebagai respons terhadap sinyal listrik masukan. Ukuran langkah umumnya adalah  $2^{\circ}$ ,  $2,5^{\circ}$ ,  $7,5^{\circ}$ , dan  $15^{\circ}$  untuk setiap pulsa listrik. Perlu diperhatikan bahwa terjadi konversi energi secara terus menerus sehingga rotor tidak berputar terus menerus seperti pada motor listrik konvensional. Motor *stepper* mengubah pulsa listrik menjadi gerakan mekanis proporsional. Setiap putaran motor *stepper* terdiri dari serangkaian langkah individu yang pasti. Satu langkah didefinisikan sebagai putaran sudut (dalam derajat) motor setiap kali menerima pulsa listrik (Mehta and Rohit, 2002).

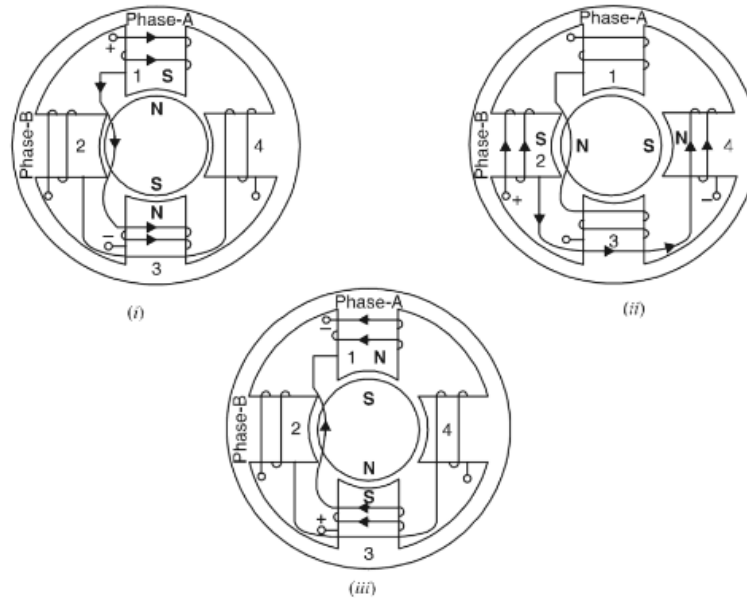
Motor *stepper* adalah jenis aktuator/penggerak spesial, motor *stepper* menerjemahkan instruksi-instruksi digital yang disimpan pada *controller* untuk menghasilkan gerak putar yang presisi, sehingga sangat cocok untuk diterapkan pada sistem elektro mekanik (Muntoha dkk., 2022). Motor *stepper* terdiri dari poros putaran berupa magnet permanen, yang disebut rotor, dan elektromagnet pada bagian stasioner yang mengelilingi motor, yang disebut stator (Roy et al., 2014).

Pada dasarnya, terdapat 3 tipe motor *stepper*. Tipe-tipe dasar motor *stepper* yaitu sebagai berikut.

1. Motor *stepper* tipe *Permanen Magnet* (PM)

Motor *stepper* magnet permanen (PM) adalah jenis motor *stepper* yang populer. Ia beroperasi berdasarkan prinsip interaksi antara rotor magnet permanen dan medan elektromagnetik. Konstruksi dari stator motor *stepper* PM terdiri dari laminasi

baja dan membawa belitan stator. Belitan stator diberi energi dari arus searah sumber untuk membuat dua atau lebih kutub stator. Rotor motor adalah magnet permanen yang terbuat dari paduan baja dengan retentivitas tinggi. Rotor mempunyai jumlah kutub genap.



Gambar 2.5. Ilustrasi Motor *Stepper Permanent Magnet* (PM) (Mehta dan Rohit, 2002).

Gambar 2.5 menunjukkan motor *stepper* PM dua fasa 2 kutub. Motor memiliki dua kutub rotor. Kumparan stator dikelompokkan membentuk belitan 2 fasa yaitu belitan fasa A dan belitan fasa B. Terminal belitan fasa dibawa keluar untuk arus searah. Gambar 2.5 (i) menunjukkan jika hanya belitan fase-A yang dieksitasi oleh arus konstan, gigi stator 1 menjadi kutub selatan. Hal ini membuat kutub utara rotor PM sejajar dengan kutub selatan (gigi stator 1) stator. Rotor akan tetap terkunci pada posisi ini selama belitan frase-A tetap diberi energi. Gambar 2.5 (ii) menunjukkan jika belitan fase-A dihilangkan energinya dan belitan fase-B diberi energi, gigi stator 2 menjadi kutub selatan. Akibatnya kutub utara rotor PM sejajar dengan kutub selatan (gigi stator 2) stator. Jadi rotor telah bergeser  $90^\circ$  berlawanan arah jarum jam. Gambar 2.5 (iii) menunjukkan jika belitan fase-B dihilangkan energinya dan fase-A tereksitasi dengan arus balik (yaitu arus di dalamnya berlawanan dengan kasus pada (i) di atas), rotor selanjutnya akan berputar  $90^\circ$  berlawanan arah jarum. Sekarang kutub utara motor PM sejajar dengan gigi stator 3.

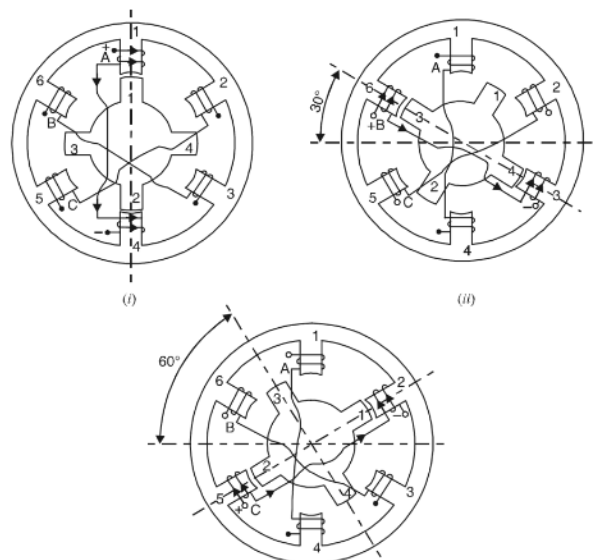
Berdasarkan Gambar 2.5, untuk menentukan sudut langkah ( $\alpha$ ), digunakan persamaan

$$\alpha = \frac{360^0}{m \cdot N_r} \quad (2.1)$$

dengan  $N$  adalah jumlah kutub rotor dan  $m$  adalah jumlah fasa, sehingga sudut langkahnya yaitu  $90^0$  (Mehta dan Rohit, 2002).

## 2. Motor *stepper* tipe *Variable Reluctance* (VR).

Motor *stepper Variable-Reluctance* (VR) beroperasi dengan prinsip yang sama seperti motor reluktansi. Artinya, ketika sepotong bahan feromagnetik, yang bebas berputar, ditempatkan dalam medan magnet, torsi bekerja pada bahan tersebut untuk membawanya ke posisi keengganan minimum terhadap jalur fluks magnet. Konstruksi stator motor *stepper VR* sama dengan konstruksi motor *stepper PM*. Gulungan fasa stator dililitkan pada setiap gigi stator. Rotor terbuat dari baja lunak dengan gigi dan slot. Gambar 2.6 menunjukkan motor *stepper VR* dasar. Pada rangkaian ini, rotor ditampilkan dengan gigi yang lebih sedikit dibandingkan stator. Hal ini memastikan bahwa hanya satu set gigi stator dan rotor yang akan sejajar pada saat tertentu. Pada Gambar 2.6, stator memiliki enam gigi dan rotor memiliki empat gigi. Stator memiliki tiga fase - A, B dan C dengan gigi masing-masing 1 dan 4, 3 dan 6 dan 2 dan 5.



Gambar 2.6. Ilustrasi Motor *Stepper Variabel Reluctance* (VR) (Mehta dan Rohit, 2002).

Ketika belitan fasa diberi energi, gigi rotor akan sejajar dengan kutub stator yang diberi energi. Gambar 2.6 (i) menunjukkan posisi rotor ketika fasa A diberi energi dengan arus konstan. Selama fase A diberi energi, rotor akan tetap diam. Perhatikan bahwa dalam kondisi ini, gigi rotor 1 dan 2 sejajar dengan gigi stator 1 dan 4 yang diberi energi. Sudut langkah  $\alpha = 0^\circ$ . Gambar 2.6 (ii) menunjukkan ketika fasa A dimatikan dan fasa B diberi energi, rotor akan berputar  $30^\circ$  searah jarum jam sehingga gigi rotor 3 dan 4 sejajar dengan gigi stator 6 dan 3 yang diberi energi. Pengaruh fase B yang menghilangkan energi dan fase C yang memberi energi ditunjukkan pada Gambar 2.6 (iii). Pada rangkaian ini, rotor selanjutnya digerakkan  $30^\circ$  searah jarum jam sehingga gigi rotor 1 dan 2 sejajar dengan gigi stator 2 dan 5 yang diberi energi. Untuk motor *stepper* VR ini, sudut langkahnya yaitu

$$\alpha = \frac{N_s - N_r}{N_s \cdot N_r} \times 360^\circ \quad (2.2)$$

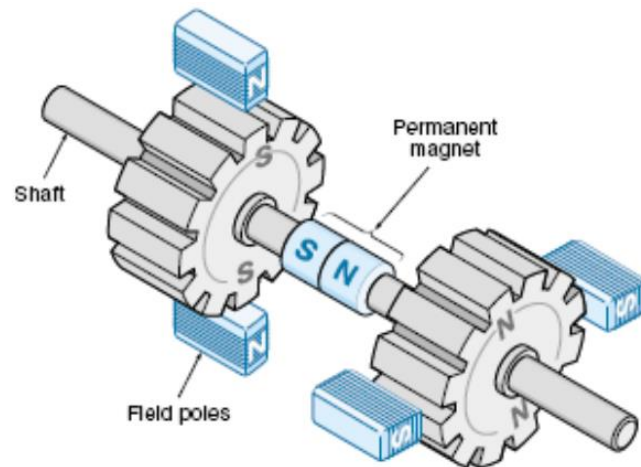
dengan  $N_s$  adalah jumlah stator,  $N_r$  adalah jumlah rotor. Oleh karena itu, rotor akan berputar  $30^\circ$  setiap kali pulsa diberikan (Mehta and Rohit, 2002).

### 3. Motor *stepper* tipe *Hybrid* (HB)

Motor *stepper hybrid* menggabungkan kelebihan/fitur motor *stepper* permanen magnet (PM) dan motor *stepper variable reluctance* (VR). Motor *stepper* jenis *hybrid* memiliki konstruksi 2 buah rotor magnet permanen dengan masing masing rotor memiliki kutub utara dan selatan yang dipasang secara bertumpuk seperti dapat dilihat pada Gambar 2.7.

Rotor dan stator pada tipe *hybrid* ini memiliki jumlah gigi yang berbeda seperti halnya pada motor *stepper* VR. Mode pengoperasian motor *stepper hybrid* sangat mirip dengan motor *stepper* PM atau VR. Gulungan fasa diberi energi dalam urutan yang benar dan rotor berputar secara bertahap. Berbeda dengan motor *stepper* PM atau VR, sudut langkah motor *stepper hybrid* tidak bergantung pada jumlah fasa stator dan hanya bergantung pada jumlah gigi rotor ( $N_r$ ).

$$\alpha = \frac{90^\circ}{N_r} \quad (2.3)$$



Gambar 2.7. Konstruksi Motor *Stepper* Tipe *Hybrid* (Sendari dkk., 2021).

Untuk motor *stepper hybrid* yang memiliki 5 gigi rotor, sudut langkahnya yaitu  $\alpha = 90^\circ/N_r = 90^\circ/5=18^\circ/\text{langkah}$ . Artinya setiap perubahan eksitasi stator maka rotor akan berputar sebesar  $18^\circ$ .

Perlu dicatat bahwa motor *stepper hybrid* beroperasi berdasarkan prinsip gabungan antara motor *stepper* PM dan motor *stepper* VR. Oleh karena itu, motor *hybrid* mengembangkan torsi eksitasi dan torsi reluktansi. Akibatnya torsi yang dihasilkan oleh motor *stepper hybrid* lebih besar dibandingkan dengan motor *stepper* PM atau VR (Mehta dan Rohit, 2002).

#### E. *Driver* Motor *Stepper* TB6600

Penggerak motor atau disebut dengan *driver* motor merupakan komponen yang berfungsi untuk mengkomunikasikan pengontrol dengan aktuator serta memperkuat sinyal keluaran dari kontroler sehingga dapat dibaca oleh aktuator (Harrizal dkk., 2017). Secara teoritis, sebuah motor *stepper* dapat digerakkan langsung oleh mikrokontroler. Pada kenyataannya, arus dan tegangan yang dikeluarkan oleh mikrokontroler terlalu kecil untuk menggerakkan sebuah motor *stepper*. Maka dari itu dibutuhkan suatu *driver* motor yang berguna untuk menaikkan arus dan tegangan yang dibutuhkan (Suryati dkk., 2019). Fungsi *driver* tersebut adalah untuk mengatur arus dan mengatur jumlah *step* yang dikirimkan dari *driver* ke motor *stepper* (Suhendro dan Antoro, 2020).



*Driver* motor TB6600 digunakan sebagai pengatur respon kecepatan motor stepper. Minimum frekuensi yang bisa diterima oleh *driver* motor TB6600 adalah 50Hz sedangkan untuk maksimal frekuensi yang dapat diterima dari *driver* motor ini adalah 20Khz. Untuk maksimal arus yang dapat dihasilkan adalah 4,5A dengan voltase minimal adalah 20V DC dan voltase maksimal adalah 32V DC (Rachman dkk., 2019). TB6600 *stepper* motor adalah *driver* motor *stepper* profesional yang mudah digunakan, sehingga dapat mengendalikan motor *stepper* dua fase. *Driver* motor *stepper* TB6600 memiliki rentang masukan daya yang lebar yaitu catu daya 9 ~ 42VDC. *Driver* motor *stepper* mendukung kontrol kecepatan dan arah. Bentuk fisik dari *driver* motor *stepper* TB6600 dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8. *Driver* Motor *Stepper* TB6600 (Nugroho dkk., 2020).

*Driver* motor ini dapat mengatur *micro step* dan arus keluaran dengan 6 DIP *switch*. Ada 7 jenis *micro step* (1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32) dan 8 jenis kontrol saat ini (0,5 A, 1 A, 1.5 A, 2 A, 2.5 A, 2.5 A, 2.8 A, 3.0 A, 3.5 A) (Patonra dkk., 2020).

*Driver* motor TB6600 mempunyai daya tinggi dengan arus maksimum 4,5 A dan arus *starting* hingga 5A. Tegangan untuk *driver* ini mampu menampung hingga 45 V. Spesifikasi tersebut menyatakan *driver* ini mampu menggerakkan motor *stepper* dengan menghasilkan kecepatan serta *torque* yang diinginkan (Suryati dkk., 2019).

## F. Pemrograman Kode G dan M pada mesin CNC *milling*

Mesin CNC hanya dapat membaca kode standar yang telah disepakati oleh industri yang membuat mesin CNC. Dengan kode standar tersebut, perangkat lunak dapat mengontrol mesin sesuai dengan kode tersebut. Kode-kode yang dimaksud yaitu kode G (*G-Code*) dan kode M (*M-Code*). *G-Code* adalah singkatan dari “*Geometric Code*”. Fungsi utamanya adalah untuk menginstruksikan mesin dalam menggerakkan motor *stepper* bagaimana cara bergerak secara geometris dalam 3 dimensi. Dalam istilah formal, *G-Code* bisa dikatakan sebagai bahasa pemrograman kontrol numerik. Hingga saat ini, *G-Code* belum memiliki konstruksi lanjutan seperti variabel, kondisional, dan *loop* (pengulangan).

Perintah kode-G yang dimulai dengan huruf G yang mengandung arti sebagai perintah geometris akan memberi tahu mesin laser bagaimana cara bergerak. Untuk tugas-tugas non-geometris, implementasi kode-G juga mendefinisikan serangkaian perintah lain yang dimulai dengan huruf M, secara tepat disebut Kode M. Misalnya, perintah M03 untuk menyalakan laser dan perintah M05 untuk mematikan laser.

Tabel kode 2.1 adalah daftar perintah persiapan paling umum yang digunakan untuk memprogram mesin CNC *milling* dan pusat permesinan CNC. Kode G yang tercantum merupakan opsi khusus yang harus tersedia pada mesin dan sistem kendali. Selain fungsi mesin, beberapa fungsi M digunakan untuk mengontrol pelaksanaan program CNC. Interupsi eksekusi program memerlukan fungsi M. Misalnya, selama perubahan pengaturan pekerjaan, seperti pembalikan bagian. Contoh lainnya adalah situasi dimana satu program memanggil satu atau lebih subprogram. Dalam kasus seperti itu, setiap program harus memiliki fungsi pemanggilan program, jumlah pengulangan, dll. Fungsi M menangani persyaratan ini dapat dilihat pada Tabel 2.2. Beberapa huruf memiliki arti pada program CNC. Daftar huruf tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.1 Pemrograman Kode G

No	Kode	Penjelasan
1	G00	Pengeposisian bebas
2	G01	Interpolasi lurus (gerak pemakanan)
3	G02	Interpolasi melingkar searah jarum jam (CW)
4	G03	Interpolasi melingkar berlawanan arah jarum jam (CCW)
5	G04	Program berhenti pada waktu tertentu
6	G10	Data program dapat dimasukan
7	G15	Pembatalan perintah koordinat polar
8	G16	Perintah koordinat polar
9	G17	Interpolasi <i>helical</i>
10	G20	Konversi satuan inchi ( <i>british</i> )
11	G21	Konversi satuan mm ( <i>metric</i> )
12	G28	Pengembalian posisi referensi
13	G31	Perintah <i>skip</i> (melangkahi)
14	G33	Pembuatan ulir ( <i>threading cutting</i> )
15	G40	Cancel kompensasi <i>cutter</i>
16	G43, G44	Kompensasi panjang <i>tool</i> positif (G43), negatif (G44)
17	G45	Menaikkan <i>offset tool</i>
18	G46	Menurunkan <i>offset tool</i>
19	G47	Menaikkan ganda <i>offset tool</i>
20	G48	Menurunkan ganda <i>offset tool</i>
21	G49	Pembatalan kompensasi panjang <i>tool</i>
22	G52	Penyatuan <i>system</i> koordinat lokal
23	G54 - G57	Sistem koordinat <i>workpiece</i>
24	G60	Pengeposisian arah tunggal
25	G63	Pengerjaan <i>tapping</i> (ulir dalam)
26	G64	Pengerjaan pemotongan
27	G74	Menghitung putaran <i>tapping</i>
28	G76	Pengerjaan proses <i>canned cycle</i>
29	G80	Pembatalan pengerjaan siklus
30	G81	Pengoperasian eksternal atau putaran <i>drilling</i>
31	G82	Keliling <i>counter</i> pengeboran
32	G83	Peck <i>drilling cycle</i>
33	G84	Pengerjaan keliling <i>tapping</i>
34	G85	Pengerjaan keliling pengeboran
35	G90	Perintah sistem koordinat <i>absolute</i>
36	G91	Perintah sistem koordinat <i>incremental</i>
37	G94	Penentuan asutan pemakanan dalam (inchi/menit)
38	G95	Penentuan asutan pemakanan dalam (inchi/putaran)
39	G96	Kecepatan potong permukaan konstan
40	G98	Kembali ke titik initial di sebuah siklus
41	G99	Kembali ke titik R di sebuah siklus

Tabel 2.2 Pemrograman Kode M

No	Kode	Penjelasan
1	M00	Penghentian program wajib
2	M01	Penghentian program optional
3	M02	Akhir program (biasanya dengan reset, tanpa pengulangan)
4	M03	Rotasi poros normal
5	M04	Rotasi poros terbalik
6	M05	Poros berhenti berputar
7	M06	Pergantian alat otomatis
8	M07	Kabut pendingin aktif
9	M08	Pendingin aktif (pompa pendingin aktif)
10	M09	Pendingin tidak aktif (pompa pendingin tidak aktif)
11	M10	Rem ke-4 sumbu aktif untuk menghentikan jalan
12	M11	Rem ke-4 sumbu tidak aktif untuk menjalankan
13	M12	<i>Tailstock quill</i> masuk
14	M13	<i>Tailstock quill</i> keluar
15	M17	<i>Turret indexing</i> ke depan
16	M18	<i>Turret indexing</i> terbalik
17	M19	Orientasi Poros (optional)
18	M21	<i>Tailstock</i> maju
19	M22	<i>Tailstock</i> mundur
20	M23	Penarikan benang secara bertahap aktif
21	M24	Penarikan benang secara bertahap tidak aktif
22	M30	Program berakhir (selalu dengan reset dan pengulangan)
23	M41	Pemilihan <i>gear</i> rendah
24	M42	Pemilihan <i>gear</i> sedang 1
25	M43	Pemilihan <i>gear</i> sedang 2
26	M44	Pemilihan <i>gear</i> tinggi
27	M48	Pembatalan penggantian laju gerak pemakanan tidak aktif
28	M49	Pembatalan penggantian laju gerak pemakanan aktif
29	M60	Penggantian palet otomatis
30	M78	Penjepit sumbu B
31	M79	Buka klem sumbu B
32	M98	Untuk memanggil program pembantu (sub-program)
33	M99	Untuk keluar dari program pembantu dan kembali ke program utama

Tabel 2.3 Pemrograman Kode Lain

No	Kode	Penjelasan
1	A	Sudut untuk memasukkan gambar langsung
2	C	Talang untuk memasukkan gambar langsung
3	D	Kedalaman pemotongan
4	E	Laju gerak makan presisi
5	F	Fungsi laju gerak makan
6	G	Perintah persiapan
7	I	Pengubah pusat busur pada sumbu X
8	K	Pengubah pusat busur pada sumbu Z
9	L	Jumlah pengulangan subprogram
10	M	Fungsi lain-lain
11	N	Nomor blok atau nomor urut
12	O	Nomor program
13	P	Nomor panggilan subprogram
14	Q	Nomor blok akhir
15	R	Penunjukan radius busur
16	S	Kecepatan porors
17	T	Fungsi alat
18	U	Nilai tambahan pada sumbu X
19	W	Nilai tambahan pada sumbu Z
20	X	Nilai absolut pada sumbu X
21	Y	Nilai absolut pada sumbu Y
22	Z	Nilai absolut pada sumbu Z

(Smid, 2003).

### G. Laser Dioda

Laser merupakan singkatan dari kata *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Laser memanfaatkan proses yang meningkatkan atau memperkuat sinyal cahaya setelah sinyal tersebut dihasilkan dengan cara lain. Proses-proses ini mencakup emisi terstimulasi (efek alami yang disimpulkan berdasarkan pertimbangan yang berkaitan dengan kesetimbangan termodinamika) dan umpan balik optik (ada di sebagian besar sistem laser). Pancaran cahaya yang dihasilkan oleh laser biasa dapat mempunyai banyak sifat yang unik. Saat membandingkan sifat laser dengan sumber cahaya lainnya, dapat dengan mudah dikenali bahwa nilai berbagai parameter sinar laser jauh melebihi atau jauh lebih ketat dibandingkan nilai banyak sumber cahaya umum. Laser umumnya memiliki

distribusi frekuensi yang lebih sempit atau intensitas yang jauh lebih tinggi atau tingkat kolimasi yang jauh lebih besar, atau durasi pulsa yang jauh lebih pendek dibandingkan dengan jenis sumber cahaya yang lebih umum. Laser adalah sumber cahaya khusus yang sebaiknya digunakan hanya jika sifat uniknya diperlukan.

Laser adalah perangkat yang memperkuat cahaya dan menghasilkan sinar yang sangat terarah dan berintensitas tinggi yang paling sering memiliki frekuensi atau panjang gelombang yang sangat murni dan tersedia dalam ukuran mulai dari kira-kira sepersepuluh diameter rambut manusia hingga ukuran bangunan yang sangat besar dengan daya berkisar antara  $10^{-9}$  hingga  $10^{20}$  W (Silfvast, 2004).

Sinar laser dioda terbentuk sebagai hasil dari laser dioda berdaya rendah yang digabungkan menjadi satu. Panjang gelombang laser dioda kira-kira 970 nm, yang juga lebih pendek dibandingkan dengan laser serat. Selain itu, sinar laser dikirimkan ke target menggunakan serat optik seperti laser serat. Laser dioda lebih baik diserap oleh bahan reflektif seperti aluminium dibandingkan dengan laser serat, namun penggunaannya jarang terjadi di industri logam. Kelemahan paling signifikan dari laser dioda adalah kualitas sinarnya karena tantangan dalam menggabungkan beberapa sinar laser yang dihasilkan oleh modul dioda berdaya rendah. Untuk menggabungkan sinar-sinar tersebut, sinar-sinar tersebut harus memiliki panjang gelombang yang berbeda (Gyasi *et al.*, 2022).

Laser semikonduktor memiliki keunikan jika dibandingkan dengan laser lainnya. Ukurannya sangat kecil, beroperasi dengan cara yang berbeda karena memerlukan penggabungan dua bahan berbeda dan aksi laser terjadi pada antarmuka antara kedua bahan tersebut. Salah satu bahan memiliki kelebihan elektron (tipe-n) dan bahan lainnya (tipe-p) memiliki kekurangan elektron. Elektron dipaksa masuk ke wilayah dari material tipe-n dan bijih holo dipaksa ke persimpangan dari material tipe-p. Elektron dengan muatan negatif dan lubang dengan muatan positif saling tarik menarik satu sama lain, dan ketika mereka bertabrakan, mereka saling menetralkan dan dalam prosesnya memancarkan radiasi rekombinasi. Elektron dalam material tipe-n berada (pada suhu normal) pada energi yang lebih tinggi (pita konduksi) dibandingkan lubang (pita valensi). Perbedaan energi ini ditetapkan sebagai celah pita material, jumlah energi yang dilepaskan ketika

proses radiasi rekombinasi terjadi. Kombinasi material yang berbeda mempunyai celah pita yang berbeda sehingga memancarkan panjang gelombang cahaya yang berbeda.

Dua jenis perangkat laser semikonduktor adalah laser pemancar tepi dan laser pemancar permukaan. Laser pemancar tepi memiliki sinar laser yang sejajar dengan permukaan daerah persimpangan. Biasanya cermin diproduksi dengan menggunakan permukaan yang dibelah di ujung kristal laser atau dengan umpan balik terdistribusi di dalam kristal atau struktur pemantul Bragg terdistribusi di ujung kristal. Laser yang memancarkan permukaan memiliki pancaran sinar laser dalam arah tegak lurus terhadap daerah persimpangan dengan cermin pemantul Bragg berlapis-lapis yang dimasukkan ke dalam kristal. Laser semikonduktor didasarkan pada salah satu dari empat jenis bahan berbeda, bergantung pada wilayah panjang gelombang yang diinginkan. Tiga diantaranya berasal dari apa yang disebut semikonduktor.

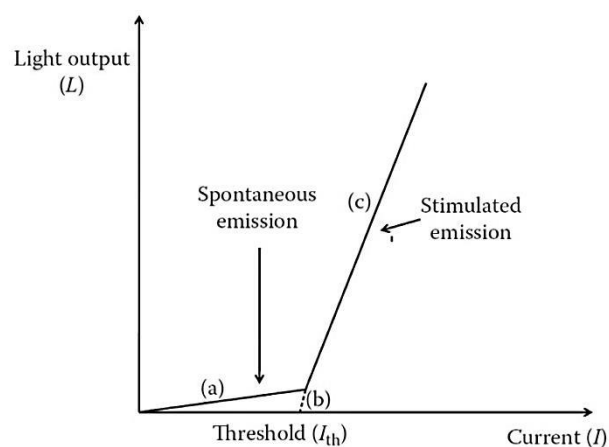
Laser ditumbuhkan dengan mendeposisikan berbagai lapisan secara berturut-turut pada substrat tertentu. Proses pertumbuhan disebut sebagai pertumbuhan epitaksi, yang melibatkan penempatan lapisan pada substrat yang sesuai. Proses pertumbuhan epitaksi ini dilakukan baik dengan *molecular beam epitaxy* (MBE) atau *metal organic chemical vapor deposition* (MOCVD). MBE diproduksi dalam ruang vakum dimana berbagai bahan yang akan diendapkan dipanaskan kemudian diuapkan dan akibatnya mengalir dari sumber uap ke substrat. Ketebalan lapisan ditentukan oleh suhu penguapan dan waktu pemaparan. Lapisan-lapisan tersebut diendapkan dengan kecepatan yang cukup lambat sehingga gugus atom tidak akan terbentuk dan karenanya melemahkan pertumbuhan susunan kisi kristal. Proses MOCVD melibatkan penggabungan atom atom yang akan diendapkan dengan molekul gas organik kompleks. Campuran gabungan kemudian dilewatkan di atas substrat yang dipanaskan, dimana panas memecah molekul dan memasukkan atom yang diinginkan ke dalam substrat. Suhu substrat disesuaikan agar mudah menerima penendapan bahan yang diinginkan.

Ketika tegangan bias maju diterapkan pada sambungan, hal ini menghasilkan aliran arus dalam bentuk elektron (dan lubang) yang mengalir ke sambungan.. jika

arusnya rendah, cahaya yang tidak koheren akan dipancarkan dari persimpangan ketika proses rekombinasi terjadi. Ini adalah cahaya yang terkait dengan dioda pemancar cahaya atau *light emitting diode* (LED). Jika arus cukup tinggi sehingga terdapat lebih banyak elektron pada pita konduksi pada energi tertentu dibandingkan pada pita valensi, maka terjadi inversi populasi dan dihasilkan penguatan.

Semikonduktor dapat dioperasikan pada basis pulsa dengan menerapkan pulsa tegangan melintasi persimpangan, namun hal ini dapat meningkatkan daya puncak. Kebanyakan laser semikonduktor juga dapat diproduksi dengan pemompaan optik, melalui penyerapan foton pompa untuk menempatkan elektron pada pita konduksi.

Koefisien penguatan dalam laser semikonduktor umumnya antara  $5.000 \text{ m}^{-1}$  dan  $10.000 \text{ m}^{-1}$ . Jadi, bahkan untuk panjang penguatan tipikal 1 mm atau kurang, penguatan per lintasan cukup besar untuk mengatasi kerugian terdistribusi yang besar (sekitar  $2.000 \text{ m}^{-1}$ ) dalam media penguatan. Bandwidth penguatan laser semikonduktor biasanya berkisar 10 Hz atau 20 nm, sesuai dengan lebar garis emisi radiasi rekombinasi. Perluasan emisi rekombinasi dalam wilayah penguatan laser (persimpangan) adalah homogen. Oleh karena itu, panjang gelombang laser umumnya akan terjadi pada puncak profil emisi rekombinasi kecuali teknik selektif frekuensi khusus digunakan untuk memilih frekuensi laser atau panjang gelombang yang diinginkan.

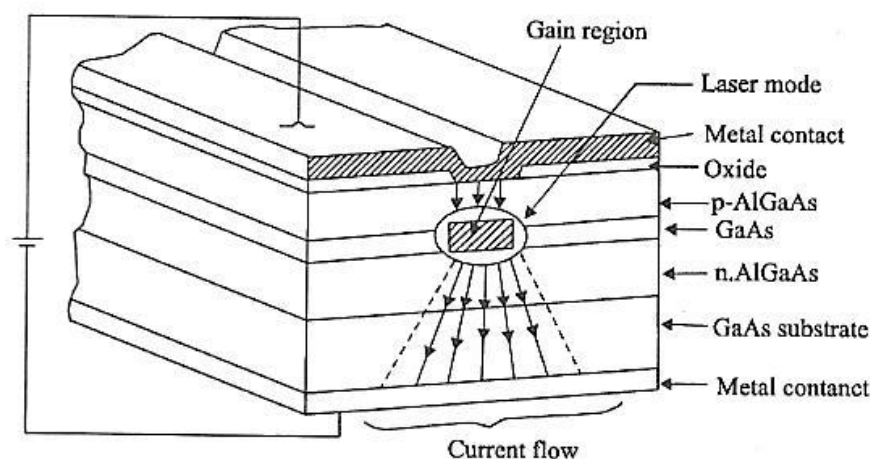


Gambar 2.9. Keluaran flux dari laser semiikonduktor terhadap arus laser (Silfvast, 2004).



Gambar 2.9 menunjukkan keluaran khas laser semikonduktor versus arus yang mengalir melalui laser. Pada arus rendah dimana penyerapan melebihi penguatan, emisi rekombinasi dari daerah persimpangan meningkat secara linier dengan arus. Pada arus ambang batas  $I_{th}$  (biasanya dinyatakan dalam mA) dimana penguatan melebihi pengurangan yang disebutkan sebelumnya, aksi laser dimunculkan secara dramatis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Panjang dalam arah aksial atau laser dari laser semikonduktor biasanya sekitar 0.2 – 1 mm, dan material memberikan penguatan seragam pada panjang tersebut. Dalam salah satu dari dua arah melintang laser heterostruktur ganda, bahan semikonduktor tambahan ditumbuhkan dalam lapisan dengan berbagai ketebalan mulai dari 5 hingga 1.000 nm untuk membentuk heterojungsi. Lapisan tambahan digunakan untuk membatasi daerah rekombinasi lubang elektron (sehingga meminimalkan timbulnya panas berlebih) dan juga untuk membatasi berkas optik. Pada arah lateral lainnya, batas material dibuat dengan teknik litograf dengan lebar beberapa ratus mikron untuk memberikan pengekanan dan pemandu arus listrik dan/atau berkas optik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Struktur Laser Penguatan (Silfvast, 2004).

Heterojungsi biasanya tumbuh pada bahan substrat seperti GaAs atau InP dengan lapisan metalisasi di bawah substrat untuk menyediakan kontak listrik. Diatas heterojungsi terdapat lapisan metaalisasi lain untuk kontak listrik. Kerapatan arus yang mengalir tegak lurus terhadap bidang sambungan adalah sekitar  $800 \text{ A/cm}^2$ , sedangkan arus maksimum yang dapat digunakan sebelum terjadi kerusakan

termal yang luas adalah sekitar 50 mA. Oleh karena itu, arus harus dibatasi pada arah lateral pada bidang sambungan dengan merancang kontak listrik sempit yang meminimalkan daerah aliran arus. Kontak listrik ini berbentuk strip logam sempit di atas heterojungsi atau lapisan seragam lebar dimana isolator diterapkan, sehingga meninggalkan daerah strip sempit tanpa insulasi sehingga arus dapat mengalir.

Rongga laser dapat diproduksi dengan salah satu dari dua cara. Pertama adalah tipikal *Rongga Fabry-Perot*, tetapi dalam hal ini cermin diproduksi di ujung media penguatan laser dengan membelah ujung kristal semikonduktor yang tegak lurus terhadap sumbu optik kristal. Karena indeks bias material yang tinggi (biasanya  $n \approx 3.5$ ), reflektifitas pada antarmuka yang dibelah tersebut berada pada urutan 30%. Reflektifitas dapat diubah dengan menambahkan lapisan dielektrik pada permukaan. Pada laser semikonduktor komersil, panjang rongga laser  $L$  biasanya berkisar antara 0,2 hingga 1 mm. Jenis rongga yang dibelah ini menghasilkan keluaran laser spektrum yang relatif luas yang terdiri dari banyak mode longitudinal, meskipun biasanya mode tunggal pada panjang gelombang dengan penguatan tertinggi akan mendominasi karena pelebaran yang homogen. Jenis rongga yang kedua adalah rongga yang menghasilkan keluaran frekuensi tunggal dengan spektrum yang sangat sempit (Silfvast, 2004).

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **A. Tempat dan Waktu Penelitian**

Penelitian ini telah dilaksanakan di Workshop Laboratorium Fisika Dasar Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang dimulai pada bulan Juli 2023 sampai dengan bulan Maret 2024.

#### **B. Alat dan Bahan**

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Laptop/PC, digunakan sebagai media perancangan alat dan pembuatan program arduino serta sebagai media untuk pembuatan laporan penelitian;
2. Multimeter Digital, digunakan untuk kalibrasi tegangan, arus, dan hambatan;
3. Jangka Sorong, digunakan untuk kalibrasi jarak perpindahan mata laser;
4. *Stopwatch*, digunakan untuk kalibrasi waktu pemotongan dan kecepatan perpindahan mata laser;
5. Bor, digunakan untuk melubangi dalam pembuatan rangka CNC;
6. Gerinda, digunakan untuk memotong pada proses pembuatan rangka CNC;
7. *Electrical tool set*, berisi perkakas listrik seperti solder, tespen, obeng, dan lain-lain yang digunakan sebagai alat bantu dalam merakit kontroler CNC laser;
8. *Tool kit set*, berisi tang potong, pengupas kabel, set kunci, set mata obeng, dan lain-lain yang digunakan sebagai alat bantu dalam merakit CNC laser.

Selain alat, bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mikrokontroler *Mach3*, digunakan sebagai kontroler dari CNC laser;

2. Catu Daya, digunakan sebagai sumber tegangan *driver* motor *stepper*, kontroler, dan laser;
3. *Driver* Motor *TB600*, digunakan sebagai penggerak motor *stepper*;
4. *Stepper* Motor *Nema 23*, digunakan sebagai media penggerak mata potong;
5. Laser Dioda 40 Watt;
6. *Relay*, digunakan sebagai saklar otomatis pengoperasian laser;
7. Kabel penghubung, digunakan untuk menghubungkan aliran listrik antar komponen pendukung;
8. Akrilik, sebagai sampel percobaan alat;
9. Alumunium Profil, salah satu bagian dari rangka CNC laser;
10. Plat Baja, salah satu bagian rangka CNC laser;
11. *Timing Belt*, salah satu bagian rangka CNC laser sebagai sistem pergerakan mata laser;
12. *Leadscrew*, salah satu bagian rangka CNC laser;
13. Saklar, digunakan sebagai tombol *on/off* pada alat;
14. Papan PCB, digunakan sebagai tempat penyambungan berbagai komponen yang digunakan.

*Software* yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. *Mach3 Mill*, digunakan untuk mengontrol pergeseran mata potong;
2. *Aspire*, digunakan untuk membuat desain dan mengkonversi ke file *g-code*.
3. *Visio*, digunakan untuk membuat diagram alir dan *flowchart*;
4. *Mendelay*, digunakan untuk membuat sitasi atau pun penulisan daftar pustaka.

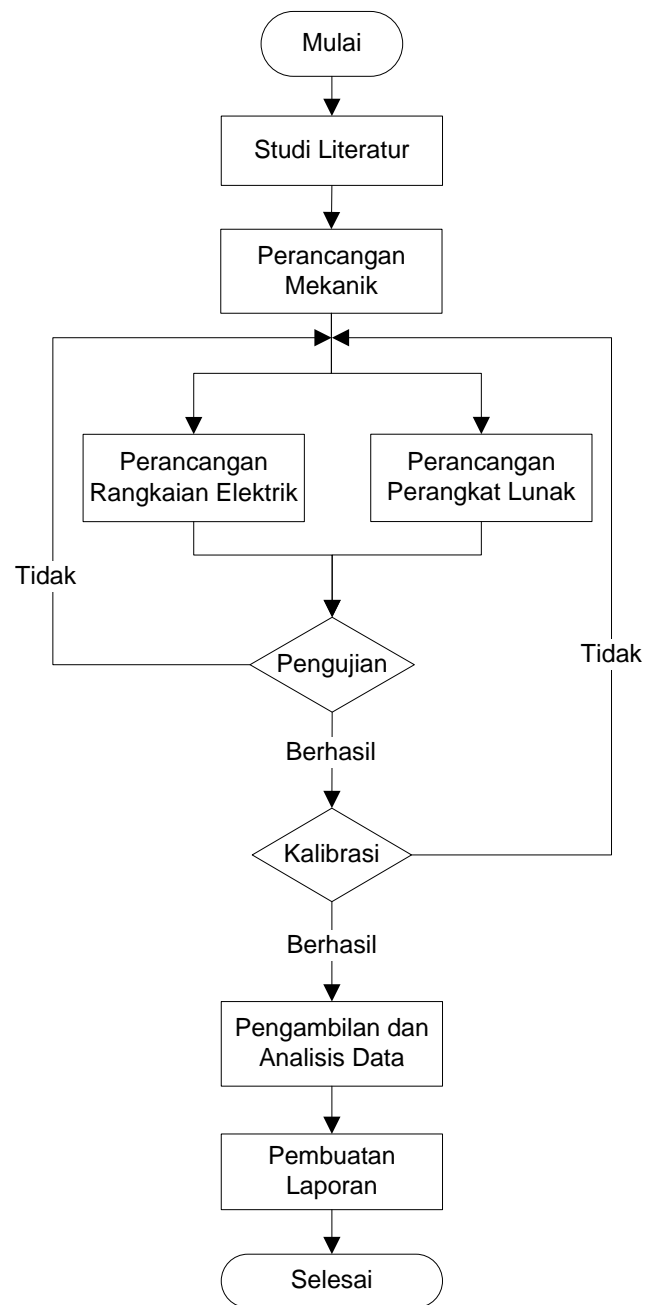
### **C. Prosedur Penelitian**

Pelaksanaan penelitian ini melalui beberapa tahap, yaitu sebagai berikut.

1. Studi literatur;
2. Perancangan mekanik;
3. Perancangan rangkaian elektrik;
4. Perancangan perangkat lunak;

5. Pengujian rangkaian elektrik;
6. Pengujian perangkat lunak;
7. Kalibrasi;
8. Pengambilan dan analisis data;
9. Pembuatan laporan.

Diagram alir dari penelitian ini yaitu dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 3.1 tersebut, langkah awal dalam melakukan penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan referensi terkait dengan penelitian dan bertujuan untuk mendapatkan teori yang lebih akurat untuk melakukan pembuatan alat ini. Setelah teori dan referensi diperoleh, selanjutnya melakukan perancangan mekanik yaitu pembuatan desain rangka CNC lalu merealisasikannya seperti pemasangan alumunium profil, plat baja, *timming belt*, *leadscrew*, motor *stepper*, dan *holder* laser.

Setelah perancangan mekanik selesai, selanjutnya yaitu perancangan rangkaian elektrik disertai dengan perancangan perangkat lunak yang dilakukan secara paralel. Perancangan rangkaian elektrik yang dilakukan yaitu *wiring* antara kontroler dengan cau daya, *driver* motor *stepper*, dan komponen pendukung seperti *relay*, lalu *wiring* antara *driver* motor *stepper* dengan motor *stepper* dan *relay* dengan modul laser, sehingga diperoleh realisasi alat sesuai dengan desain.

Perancangan perangkat lunak juga dilakukan sembari melakukan perancangan rangkaian elektrik. Perancangan perangkat lunak yaitu dengan melakukan beberapa pengaturan perangkat lunak *Mach3* dengan kontroler agar perangkat lunak dapat mengendalikan kontroler dengan baik sesuai dengan yang diinginkan, seperti pengaturan pin masukan dan keluaran kontroler *Mach3*, kecepatan dan akselerasi serta banyaknya *step* per rotasi pada motor *stepper* (*motor tuning*), kecepatan pemotongan (*feedrate*), serta daya laser (*spindle*).

Pengaturan pin masukan dan keluaran yaitu dengan menyesuaikan pin masukan *limit switch* pada masing-masing sumbu (*X Home*, *Y Home*, dan *Z Home*) serta pin keluaran *driver* motor *stepper* pada masing-masing sumbu (X,Y, dan Z). Pengaturan kecepatan dan akselerasi motor *stepper* dilakukan dengan menentukan kecepatan serta percepatan dan perlambatan paling efisien dalam melakukan pergeseran mata laser menggunakan motor *stepper*. Pengaturan banyaknya *step* per rotasi pada motor *stepper* dilakukan dengan kalibrasi perpindahan mata laser. Penentuan banyaknya *step* per rotasi melibatkan ukuran diameter poros motor *stepper* serta konversi dari gerak rotasi pada motor *stepper* menjadi gerak translasi pada mata laser.

Lain halnya dengan pengaturan pin masukan dan keluaran serta pengaturan *motor tuning* yang dilakukan pada perangkat lunak *Mach3*, pengaturan kecepatan pemotongan dan daya laser dilakukan pada perangkat lunak *aspire*. *Aspire* digunakan untuk melakukan desain pemotongan dan menjadi media dalam mengonversi desain menjadi *G-code*. Perangkat lunak *Aspire* adalah solusi yang mudah dipelajari dan elegan untuk pekerjaan kompleks dalam merancang dan membuat komponen 2D dan 3D dengan mesin CNC, *Aspire* juga memiliki alat yang memungkinkan untuk mengubah sketsa 2D, foto, gambar, dan karya seni digital menjadi model relief 3D yang mendetail dan kemudian menghitung jalur kasar dan alat *finishing* 3D untuk memotongnya secara akurat (Akbar dan Susanti, 2021). Pengaturan kecepatan pemotongan dilakukan pada perangkat lunak *aspire* yang selanjutnya keluaran berupa G-Code dimasukan pada perangkat lunak *Mach3*. Selain itu, pengaturan daya laser juga dilakukan sama halnya dengan pengaturan kecepatan pemotongan, yaitu dilakukan melalui perangkat lunak *aspire* yang kemudian dikonversi kedalam *G-code* lalu dimasukan pada perangkat lunak *Mach3*. Namun, pengaturan *pulse width modulation* (PWM) tetap dilakukan pada perangkat lunak *Mach3* untuk menentukan batas nilai minimum dan maksimum PWM.

Pengaturan pengaturan tersebut telah diinisialisasi dengan *g-code*. *G-code* ini merupakan perintah baku yang telah dibuat untuk CNC laser, sehingga kontroler *Mach3* hanya bisa membaca *g-code* untuk diterapkan pada CNC laser. Setelah perancangan rangkaian elektrik dan perancangan perangkat lunak telah selesai dilakukan, langkah selanjutnya yaitu pengujian terhadap komponen keseluruhan CNC laser. Pengoperasian CNC laser harus sesuai dengan perintah G-code yang dimasukan. Apabila belum sesuai, maka kembali lagi ke tahap perancangan rangkaian elektrik dan perancangan perangkat lunak.

Setelah semua komponen CNC laser berjalan sesuai dengan fungsi *g-code*, tahap selanjutnya yaitu kalibrasi hasil pengukuran pada CNC laser menggunakan alat ukur yang telah disediakan yaitu jangka sorong. Jangka sorong digunakan untuk mengukur jarak pergeseran mata laser. Selain jangka sorong, alat ukur yang digunakan untuk kalibrasi adalah *stopwacth*. *Stopwatch* digunakan untuk

mengukur lama waktu pergeseran sehingga diperoleh nilai kecepatan pergerakan mata laser. Kalibrasi yang dilakukan yaitu memberikan perintah kontroler dalam melakukan pergeseran mata laser, apakah hasil pergeseran sesuai dengan nilai masukan yang diberikan seperti jarak pergeseran dan kecepatan pergeseran. Apabila belum sesuai maka kembali lagi ke tahap perancangan rangkaian elektrik dan perancangan perangkat lunak hingga kalibrasi berhasil dan nilai masukan sudah sesuai dengan keluaran dari CNC laser.

Setelah proses kalibrasi berhasil, langkah selanjutnya yaitu melakukan analisa dan pengambilan data. Pengambilan data dilakukan dengan tujuan agar mengetahui sejauh mana alat dapat beroperasi. Data yang diperoleh berupa hasil kalibrasi pergeseran mata laser dan hasil pemotongan pada material akrilik dengan dimensi tebal 3 mm dan 5mm terhadap kecepatan pemotongan dengan pengaturan daya laser maksimum. Setelah semua data diperoleh, langkah terakhir yaitu pembuatan laporan penelitian.

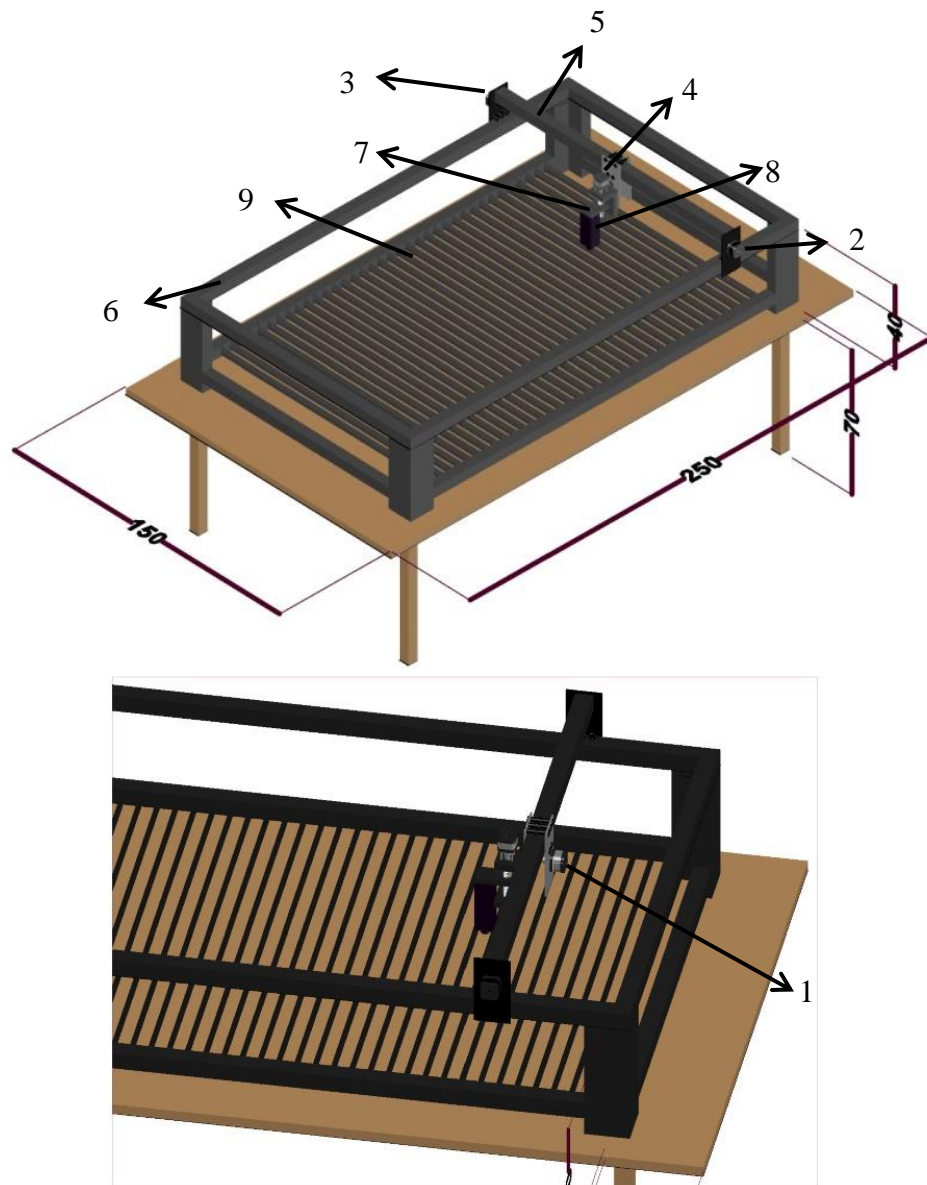
#### **D. Perancangan Alat**

Perancangan alat pada penelitian ini dibagi dalam 2 macam, yaitu perancangan rangka CNC Laser dan perancangan kontroler CNC Laser.

##### **1. Perancangan Rangka CNC Laser**

Adapun perancangan rangka CNC laser pada penelitian ini rencana akan direalisasikan seperti pada Gambar 3.2. Berdasarkan Gambar 3.2, dapat dilihat bahwa prinsip kerja dari mesin CNC laser ini adalah dengan menggerakkan mata potong yang berupa laser menggunakan motor *stepper* sesuai dengan sumbu yang diinginkan. Pada mesin CNC laser ini, motor *stepper* yang digunakan yaitu sebanyak 4 buah yang diletakkan pada 3 sumbu (X, Y dan Z), yaitu 1 buah *stepper* untuk melakukan pergerakan laser di sumbu X yang bergerak kearah kanan dan kiri, 2 buah *stepper* untuk melakukan pergerakan laser di sumbu Y yang bergerak kearah depan dan belakang, dan 1 buah *stepper* untuk melakukan pergerakan laser di sumbu Z yang bergerak naik dan turun.





Keterangan:

- |                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| 1. Motor <i>Stepper</i> X    | 6. Rangka Pergerakan Sumbu Y |
| 2. Motor <i>Stepper</i> Y1   | 7. <i>Holder</i> Laser       |
| 3. Motor <i>Stepper</i> Y2   | 8. Laser Dioda               |
| 4. Motor <i>Stepper</i> Z    | 9. Bidang Kerja              |
| 5. Rangka Pergerakan Sumbu X |                              |

Gambar 3.2. Desain Rangka CNC Laser

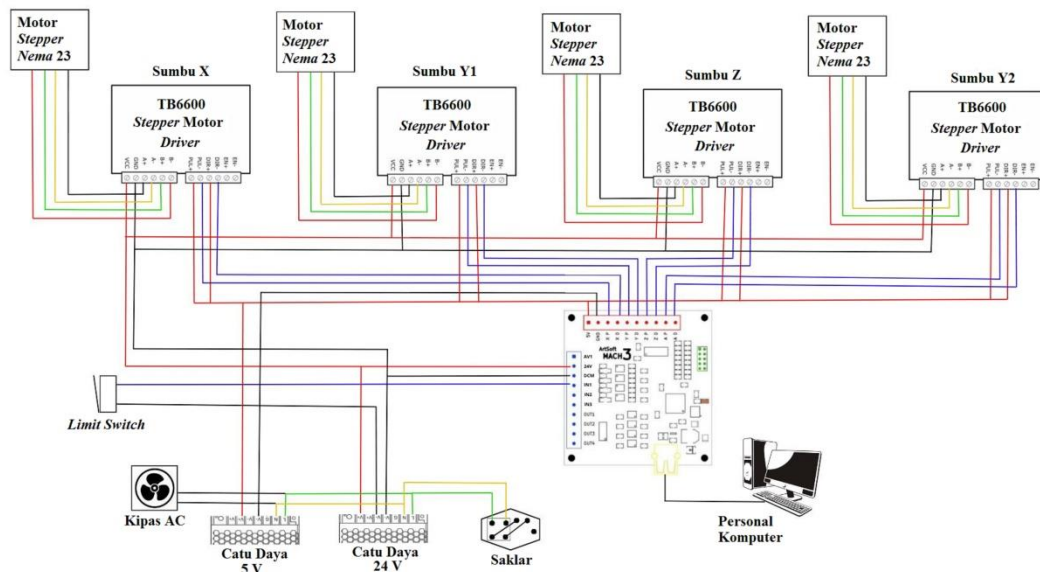
Posisi motor *stepper* sumbu Z terletak didekat laser. Fungsi motor *stepper* disini yaitu untuk menggerakkan posisi laser beserta *holder* laser kearah atas dan bawah. Fungsi ini digunakan untuk mengatur jarak laser terhadap bidang kerja serta mengatur ketebalan dari media yang akan dipotong. Selanjutnya yaitu motor *stepper* sumbu X yang diletakkan di dekat laser. Fungsi motor *stepper* di bagian ini adalah untuk menggerakkan laser beserta motor *stepper* sumbu Z kearah kanan dan kiri. Bagian lain terdapat pergerakan di sumbu Y. Motor *stepper* sumbu Y diletakkan di bagian kanan dan kiri rangka CNC. Fungsi motor *stepper* di bagian ini adalah untuk menggerakkan laser beserta motor *stepper* sumbu X dan sumbu Z beserta rangka pergerakan sumbu X kearah depan dan belakang. Karena beban *stepper* di sumbu Y cukup besar, maka dibutuhkan 2 buah motor *stepper* untuk menggerakkan bagian kanan dan bagian kiri agar pergerakan seimbang. Sehingga pergerakan antara kedua motor *stepper* ini harus sama, baik arah maupun kecepatannya.

Selain itu terdapat alas bidang kerja berbahan dasar alumunium. Bahan alumunium tersebut digunakan karena laser yang digunakan belum bisa untuk memotong media berbahan dasar metal.

## 2. Perancangan kontroler CNC

Kontroler CNC merupakan otak dari mesin CNC laser ini, bagian ini yang mengatur seluruh pergerakan pada mesin CNC laser. Berikut merupakan desain dari kontroler CNC dapat dilihat pada Gambar 3.3.

Berdasarkan Gambar 3.3 tersebut, kontroler yang digunakan pada penelitian ini yaitu kontroler *Mach3*. Kontroler ini mampu mengendalikan 4 sumbu yang menggerakkan bagian dari rangka CNC agar tercipta mesin CNC yang mampu bergerak secara 3D. Rangkaian tersebut membutuhkan catu daya sebagai sumber tegangan. Tegangan yang dibutuhkan untuk mengakses kontroler *Mach3* ini yaitu maksimum sebesar 5 volt. Selain itu, *Mach3* juga membutuhkan tegangan sebesar 24 volt yang digunakan sebagai sumber tegangan pada penggerak (*driver*) motor *stepper TB6600* yang mampu menerima tegangan dari 20 volt sampai 32 volt.



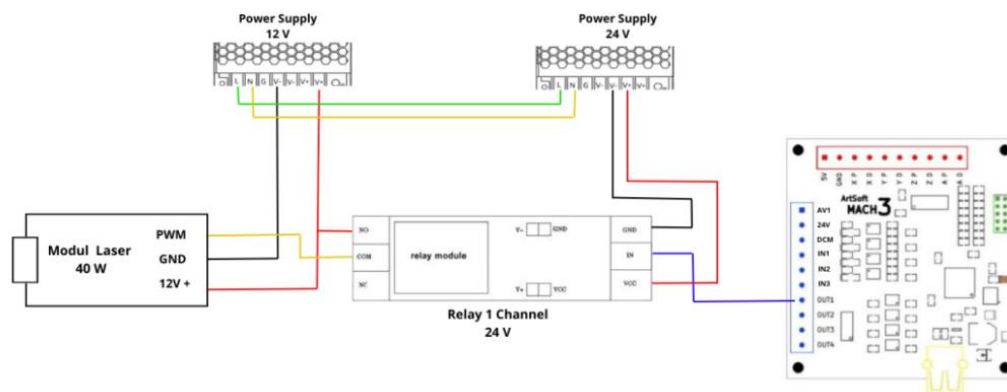
Gambar 3.3. Desain kontroler CNC

Selanjutnya, kontroler *Mach3* ini terhubung dengan *driver* motor *stepper*. Kontroler *Mach3* ini 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. Untuk maksimal arus yang dapat dihasilkan adalah 4,5 A dengan voltase minimal adalah 20 volt dan voltase maksimal adalah 32 volt. *Driver* motor *stepper* TB6600 ini berfungsi sebagai perangkat pengontrol putaran dan kecepatan motor *stepper* *nema23*. *Stepper nema23* yaitu motor *stepper* bertipe bipolar yang memiliki torsi tinggi berfungsi sebagai aktuator penggerak *roller* pada bagian penarik (Rachman dkk., 2019).

Terdapat komponen tambahan yang dikendalikan oleh *Mach3* yaitu kipas AC. Fungsi dari kipas ini adalah untuk mengeluarkan udara panas yang terdapat di dalam *box* panel kontroler. *Box* panel kontroler yang dibuat berisi kontroler *Mach3* sebanyak 1 buah, *driver* motor *stepper* TB6600 sebanyak 4 buah, catu daya 24V dan 12V sebanyak masing-masing 1 buah, dan *relay* 24V sebanyak 1 buah. Apabila keseluruhan komponen tersebut beroperasi, maka akan muncul udara panas dari masing masing komponen. Oleh sebab itu, untuk menghindari

kerusakan pada komponen, diperlukan kipas yang dapat mengeluarkan udara panas di dalam *box* panel.

Selain itu, kontroler *Mach3* juga mengendalikan komponen *limit switch* yang berperan sebagai masukan pada kontroler. *Limit switch* digunakan sebagai pembatas pergerakan di setiap sumbu. Pembatasan pergerakan motor *stepper* ini berfungsi agar pergerakan CNC tidak melebihi bidang kerja yang disediakan. Keluaran dari mesin CNC ini adalah laser yang digunakan untuk memotong dan menggrafir bidang kerja, salah satu contohnya yaitu akrilik. Rangkaian keluaran laser dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Rangkaian Keluaran Laser

Pada Gambar 3.4, laser dihubungkan terhadap keluaran di kontroler *Mach3*. Pin yang digunakan yaitu *output 1*. Fungsi dari pin *output 1* yaitu memberikan tegangan dalam rentang 0-24 V menggunakan perintah *M-Code* yaitu *M5* dan *M3*. Kode *M5* digunakan untuk memberikan tegangan minimum, yaitu 0 V yang artinya apabila laser diberikan tegangan 0 V maka laser tidak beroperasi. Namun pada perintah *M3* digunakan untuk memberikan tegangan maksimum dengan pengaturan khusus untuk keluaran pin *output 1* dalam menjalankan *spindle*. *Spindle* disini merupakan nama keluaran di perangkat lunak *Mach3* yang biasa digunakan untuk pengoperasian *router*. Karena pada penelitian ini menggunakan laser sebagai media potongnya, maka bisa kita anggap bahwa arti *spindle* disini merupakan pin keluaran untuk pengaturan *pulse width modulation* (PWM) pada laser. PWM akan bekerja ketika pada perangkat lunak *Mach3* khususnya pada pengaturan *spindle* diubah berdasarkan kebutuhan laser. Namun, karena pada

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

Tegangan keluaran 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*. Diperlukan tambahan komponen catu daya 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 3.4. Pada rangkaian tersebut, pin keluaran *relay* yang digunakan yaitu *Normally Open* (NO). Pin tersebut yang mampu memutus arus listrik secara otomatis. Kabel yang terhubung pada keluaran dari *relay* yaitu kabel yang menghubungkan antara pin PWM pada laser dan pin catu daya 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*.

### 3. Perancangan Perangkat Lunak *Mach3*

Kontroler *Mach3* board memiliki sebuah perangkat lunak bawaan bernama *Mach3*. Perangkat lunak ini berfungsi sebagai masukan dari kontroler *Mach3 board*. Perangkat lunak ini bekerja dengan mengirimkan data *G-code* dan *M-code* ke kontroler *Mach3*, lalu kontroler *Mach3* akan memberikan sinyal kepada komponen-komponen seperti *driver* motor *stepper*, dan *relay* yang mengontrol *on* dan *off* dari laser. Cara mengoperasikan perangkat lunak *Mach3* ini yaitu dengan

melakukan pengaturan pin masukan dan keluaran pada kontroler *Mach3*. Pengaturan pin masukan ditujukan pada komponen *limit switch*, dan pengaturan keluaran ditujukan pada motor *stepper* dan laser. Selanjutnya, melakukan pengujian dan dilanjutkan dengan kalibrasi pada pergerakan motor *stepper* yang harus sesuai dengan masukan berupa vektor dalam perintah *G-code* serta pengoperasian laser melalui *relay* menggunakan perintah *M-code*.

### E. Teknik Pengambilan Data

Data yang akan diambil pada penelitian ini yaitu seperti pada Tabel 3.1, Tabel 3.2, dan Tabel 3.3.

Tabel 3.1. Data pengujian *feedrate* terhadap waktu pada jarak perpindahan 250 mm

No	<i>Feedrate</i> (mm/menit)	Waktu (menit.detik)
1	25	
2	30	
3	35	
4	40	
5	45	
6	50	
7	55	
8	60	
9	65	



Tabel 3.3. Data pengujian jarak perpindahan terhadap waktu pada *feedrate* 55 mm/menit

No	Jarak Perpindahan (mm)	Waktu (menit.detik)
1	250	
2	500	
3	750	
4	1000	

Tabel 3.4. Data pengujian akurasi

No	Masukan Jarak Perpindahan (mm)	Keluaran Jarak Perpindahan (mm)		Kesalahan Relatif (%)	
		Sumbu X	Sumbu Y	Sumbu X	Sumbu Y
1	250				
2	500				
3	750				
4	1000				

Tabel 3.5. Data pengujian presisi

No	Masukan Jarak Perpindahan (mm)	Keluaran Jarak Perpindahan (mm)		Standar Deviasi	
		Sumbu X	Sumbu Y	Sumbu X	Sumbu Y
1	500				
2	500				
3	500				
4	500				



## BAB V

### SIMPULAN DAN SARAN

#### A. Simpulan

Berdasarkan data yang diperoleh, maka kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mesin CNC menggunakan mata potong berupa laser telah direalisasikan menggunakan laser dioda 40 Watt dan tegangan masukan sebesar 12V.
2. Mesin CNC laser telah direalisasikan dengan pengoperasian menggunakan *software Mach3* yang dikontrol menggunakan *Personal Computer (PC)*. Pengoperasian mesin CNC laser menggunakan perintah vektor dalam melakukan pergerakan geometri dan perintah dalam mengoperasikan laser. Sehingga penggunaan pada *software Mach3* dilakukan dengan memasukan *G-code* dan *M-code*.
3. Mesin CNC laser pada penelitian ini telah menghasilkan potongan akrilik dengan ketelitian mencapai 0,1 mm. Mesin CNC laser pada penelitian ini memiliki kesalahan relatif pada sumbu X yaitu sebesar 0,29% dan pada sumbu Y sebesar 0,25%, sehingga kesalahan relatif rata-rata yang diperoleh yaitu sebesar 0,27%. Mesin CNC laser pada penelitian ini memiliki deviasi pada sumbu X yaitu 0,25 dan pada sumbu Y yaitu 0,25, sehingga deviasi rata-rata yang diperoleh yaitu sebesar 0,25.
4. Mesin CNC laser pada penelitian ini mampu memotong akrilik lembaran dengan ketebalan 3mm dan dimensi 1000 mm x 2000 mm dengan pengaturan *feedrate* 55 mm/menit dan jarak laser terhadap akrilik sejauh 15mm. Waktu yang diperlukan dalam melakukan proses pemotongan akrilik dengan lebar 1000 mm yaitu 18 menit 16 detik.

**B. Saran**

Berdasarkan kesimpulan yang diperoleh, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya yaitu menggunakan laser dioda dengan daya yang lebih tinggi dari 40 watt atau menggunakan laser CO agar proses pemotongan menjadi lebih cepat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A., dan Susanti, N. A. 2021. Penerapan Software Vetric Aspire CNC untuk Meningkatkan Hasil Belajar Siswa pada Mata Pelajaran CNC dengan Pembuatan Grafir di SMK Taruna Jaya Prawira Tuban. *JPTM*. 10(2) : 21–26.
- Amala, M., dan Widyanto, S. 2014. Pengembangan Perangkat Lunak Sistem Operasi Mesin Milling CNC Trainer. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(3) : 204–210.
- Elmiawan, P., Dharmanto, Adik, S. W., Fazalul, M. M., dan Arief, R. 2022. Akurasi Mesin CNC Router Low Budget berbasis Mach 3. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 15(2) : 70–75.
- Gyasi, E. A., Antila, A., Owusu-Ansah, P., Kah, P., and Salminen, A. 2022. Prospects of Robot Laser Cutting in the Era of Industry. *World Journal of Engineering and Technology*. 10(1) : 639–655.
- Harrizal, I. S., Syukran, dan Prayitno, A. 2017. Rancang Bangun Sistem Kontrol Mesin CNC Milling 3 Axis menggunakan Close Loop System. *JOM FTEKNIK*. 4(2) : 1–8.
- Hasibuan, M. R. A., Muhaimin, dan Hardi, S. 2019. Rancang Bangun Mesin CNC Milling 3- Axis untuk Enggrave PCB Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Tektro*. 3(1) : 40–47.
- Jufrizaldy, M., Ilyas, I., dan Marzuki, M. 2020. Rancang Bangun Mesin CNC Milling menggunakan Sistem Kontrol GRBL untuk Pembuatan Layout PCB. *Jurnal Mesin Sains Terapa*. 4(1) : 37–44.
- Julian, M. D., Pranomo, G. E., dan Yuliaji, D. 2023. Retrofit Sistem Kontrol Penggerak Sumbu X, Y, Dan Z Pada Mesin CNC Milling DMTG XD-40A. *Jurnal ALMIKANIK*. 5(3) : 114–124.
- Ma'arif, K., Yusril, M., Sunding, A., dan Wibowo, N. R. 2021. Rancang Bangun Mesin CNC Router. *Jurnal Tematis*. 3(1) : 1–7.
- Madison, J. 1996. *CNC Machining Handbook (Basic Theory, Production Data, and Machining Procedure)*. Industrial Press Inc., New York.
- Mehta, V. K., and Rohit, M. 2002. *Principle of Electrical Machine*. S. Chand and Company Limited, New Delhi.

- Muchlis, A., Ridwan, W., dan Nasibu, I. Z. 2021. Rancang Bangun Mesin CNC (Computer Numerical Control) Laser dengan Metode Design for Assembly. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 3(1) : 23–27.
- Muntoha, G. B., Wati, I. E., dan Wijaya, M. S. 2022. Perancangan Sistem Instrumentasi dan Kontrol Berbasis Super PLC F2424 serta Antarmuka LabVIEW. *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*. 3(2) : 61–65.
- Nugroho, A. B., Auliq, M. A., dan Alrasyid, M. Z. 2020. 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)*. 2(2) : 75–86.
- Patonra, A. H., Masita, S., Wibowo, N. R., dan Fitriati, A. 2020. Rancang Bangun Media Pembelajaran Praktik Motor Stepper. *Mechatronics Journal in Professional and Entrepreneur*. 2(1) : 7–11.
- Rachman, Herman, M., Fitriati, A., dan Elviralita, Y. 2019. Rancang Bangun Mesin Penekuk Kawat Baja Spring Bed Berbasis Mikrokontroler, *Mechatronics Journal in Professional and Entrepreneur*. 1(2) : 41–48.
- Raharjo, R. 2017. Pengelolaan Alat Bahan dan Laboratorium Kimia, *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. 20(2) : 99–104.
- Ridwan, F., dan Widodo, S. 2023. Rancang Bangun Mesin Potong Logam Plasma CNC 3 Axis. *Jurnal Teknik Mesin dan Mekatronika (Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics)*. 8(1) : 16–25.
- Roy, T. S., Kabir, H., and Chowdhury, M. 2014. Simple Discussion on Stepper Motors for the Development of Electronic Device. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 5(1) : 1089–1096.
- Salam, A., Iswar, M., Rifaldi, M., Malik, S., dan Putra, K. 2020. Rancang Bangun Mesin CNC Router Mini Untuk Pembelajaran Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*. 17(2) : 150-155.
- Salam, A., Rasyid, S., Ta'bi, F., dan Fahrival, R. 2020. Rancang Bangun Mesin CNC Laser Cutting untuk Pembelajaran Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin. *SINERGI*. 18(1) : 1–7.
- Sendari, S., Wirawan, I. M., dan Nasrulloh, M. 2021. *Sensor Transduser*. Ahlimedia Press, Malang.
- Silfvast, W. T. 2004. *Laser Fundamentals Second Edition*. Cambridge University Press, New York.
- Smid, P. 2003. *CNC Programming Handbook Second Edition*. Industrial Press Inc., New York.
- Soedjarwanto, N., Nama, G. F., dan Nugroho, R. A. 2021. Prototipe Smart Door

- Lock menggunakan Motor Stepper Berbasis IOT (Internet of Things). *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*. 15(2) : 73–82.
- Suhendro, B., dan Antoro, L. M. 2020. Sistem Kendali Penggerak Motor Stepper pada Orbital Welding menggunakan Perangkat Lunak LabVIEW. *Prosiding SNFA*. 47–56.
- Suheri, S.-, Fadillah, N., Nazaruddin, N., dan Arif, Z. 2019. Perancangan dan Pembuatan Mesin Water Jet Cutting (WJC) sebagai Alat Pemotong Lembaran Karet. *Journal of Mechanical Engineering Manufactures Materials and Energy*. 3(2) : 100–108.
- Suryati, Misriana, Fauziah, A., dan Mellyssa, W. 2019. Pengaturan Gerakan Translasi Menggunakan Motor Stepper. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*. 3(1) : 89–94.
- Yanto, A., Anrinal, dan Putra, I. M. 2021. Desain dan Analisis Struktur Mesin CNC Laser Engraver. *Jurnal Teknik Mesin*. 11(2) : 107–116.