

**RANCANG BANGUN MESIN *COMPUTER NUMERICAL CONTROL*
(CNC) *ROUTER 4 AXIS* MENGGUNAKAN *BOARD USB MACH 3* DAN
MOTOR *STEPPER NEMA-23* DENGAN APLIKASI *MACH 3***

Skripsi

Oleh

**AMAPEL ODENIA
1917041037**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

RANCANG BANGUN MESIN *COMPUTER NUMERICAL CONTROL* (CNC) *ROUTER 4 AXIS* MENGGUNAKAN *BOARD USB MACH 3* DAN *MOTOR STEPPER NEMA-23* DENGAN APLIKASI *MACH 3*

Oleh

Amapel Odenia

Penelitian mengenai rancang bangun mesin *Computer Numerical Control* (CNC) *Router 4 axis* telah dilakukan menggunakan modul *board USB Mach 3*. Tujuan penelitian ini adalah membuat rancang bangun mesin CNC yang dapat memotong bahan akrilik dengan memperhatikan nilai akurasi, presisi, dan *error* pada setiap sumbu X, Y₁, Y₂, dan Z. Mesin CNC merupakan salah satu perkembangan teknologi mesin perkakas dengan sistem kontrol yang dioperasikan secara otomatis oleh perintah yang diprogram. Mesin CNC *Router* merupakan penggabungan teknologi CNC dengan *Router*. CNC difungsikan untuk mengontrol pergerakan proses memotong dan *Router* difungsikan sebagai pemutar alat potong. Tahap penelitian meliputi Perancangan mesin CNC, pembuatan kerangka mesin, kalibrasi gerakan sumbu, pengujian mesin, pengambilan data, dan analisis data. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi rancang bangun mesin CNC *Router 4 axis* dapat digunakan untuk pemotongan media bahan akrilik. Analisis nilai hasil tiap sumbu mesin diperoleh nilai rata-rata akurasi 99,59%, presisi 99,49%, dan rata-rata *error* 0,41% pada sumbu X, nilai rata-rata akurasi 99,21%, presisi 99,29%, dan rata-rata *error* 0,79% pada sumbu Y₁ dan Y₂, dan nilai rata-rata akurasi 97,17%, presisi 99,82%, dan rata-rata *error* 2,83% pada sumbu Z.

Kata kunci : CNC, *Router*, Mach 3, Nema-23

ABSTRACT

DESIGN OF 4 AXIS COMPUTER NUMERICAL CONTROL (CNC) ROUTER MACHINE USING MACH 3 USB BOARD AND NEMA-23 STEPPER MOTOR WITH MACH 3 APPLICATION

By

Amapel Odenia

Research on the design of a 4-axis Router Computer Numerical Control (CNC) machine has been carried out using the Mach 3 USB board module. The purpose of this research is to design a CNC machine that can cut acrylic material by paying attention to the accuracy, precision, and error values on each X, Y₁, Y₂, and Z axis. CNC machine is one of the developments in machine tool technology with a control system that is operated automatically by programmed commands. CNC Router Machine is a combination of CNC technology with a Router. CNC functioned to control the movement of the cutting process and the Router functioned as a cutting tool player. The research stages include CNC machine design, machine frame making, axis movement calibration, machine testing, data collection, and data analysis. The results showed that the implementation of the 4 axis CNC Router machine design can be used for cutting acrylic material media. Analysis of the value of the results of each axis of the machine obtained accuracy of 99.59%, precision of 99.49%, and error of 0.41% on the X axis, accuracy of 99.21%, precision of 99.29%, and error of 0.79% on the Y₁ and Y₂ axis, and accuracy of 97.17%, precision of 99.82%, and error of 2.83% on the Z axis.

Keyword : CNC, Router, Mach 3, Nema-23

**RANCANG BANGUN MESIN *COMPUTER NUMERICAL CONTROL*
(CNC) *ROUTER 4 AXIS* MENGGUNAKAN *BOARD USB MACH 3* DAN
MOTOR *STEPPER NEMA-23* DENGAN APLIKASI *MACH 3***

Oleh

AMAPEL ODENIA

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

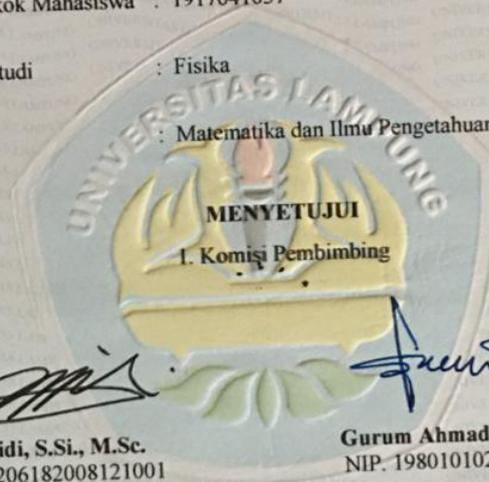
Judul Skripsi : Rancang Bangun Mesin *Computer Numerical Control (CNC) Router 4 Axis* Menggunakan Board USB Mach 3 dan Motor *Stepper Nema-23* dengan Aplikasi Mach 3

Nama Mahasiswa : *Amapel Odenia*

Nomor Pokok Mahasiswa : 1917041037

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Junaidi
Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.
NIP. 198206182008121001

Ahmad Pauzi
Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

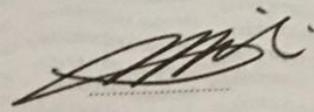
Ketua Jurusan Fisika FMIPA

Ahmad Pauzi
Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

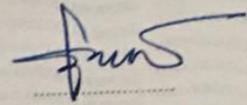
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

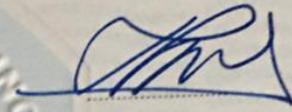
Ketua : Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.



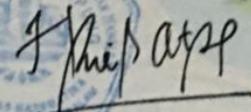
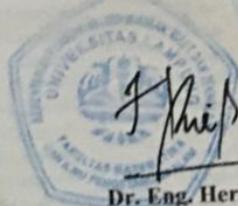
Sekretaris : Gorum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.



Anggota : Drs. Amir Supriyanto, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si, M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 Desember 2023

PERNYATAAN

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

Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 12 Desember 2023

Penulis,



Amapel Odenia
NPM. 1917041037

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Amapel Odenia dilahirkan pada 18 Juni 2001 di Sidowaluyo Lampung Selatan. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Sujono dan Ibu Kasih. Penulis menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di MI Mathlaul Anwar kecamatan Sidomulyo Kabupaten Lampung Selatan pada tahun 2013, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 1 Sidomulyo dan lulus pada tahun 2016. Kemudian pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan tingkat menengah atas di SMA Negeri 1 Kalianda dan tamat pada tahun 2019. Pada tahun 2019, penulis melanjutkan pendidikan ke tingkat perguruan tinggi di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Lampung melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menempuh jenjang pendidikan S1 di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, penulis memilih konsentrasi pada bidang Fisika Instrumentasi, kemudian melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di BMKG Stasiun Meteorologi Kelas I Radin Inten II Lampung. Selanjutnya penulis mengikuti program pengabdian masyarakat dengan mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Wonoharjo, Kecamatan Sumberejo, Kabupaten Tanggamus pada tahun 2022. Penulis juga mengikuti program Kampus Mengajar Angkatan 3 pada Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) tahun 2022 di SDN 1 Tanjung Agung.

MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(Q.S Al-Baqarah, 2:286)

“Untuk masa-masa sulitmu, biarlah Allah yang menguatkanmu, Tugasmu hanya berusaha agar jarak antara kamu dan Allah tidak pernah jauh”

“Selalu ada harga dalam sebuah proses. Nikmati saja lelah-lelah itu. Lebarakan lagi rasa sabar itu. Semua yang kau investasikan untuk menjadikan dirimu serupa yang kau impikan, mungkin tidak akan selalu berjalan lancar. Tapi, gelombang-gelombang itu yang nanti bisa kau ceritakan”

(Boy Chandra)

Orang lain tidak akan paham *struggle* dan masa sulitnya kita, yang mereka ingin tahu hanya bagian dari *success stories*-nya saja. Kalau memang belum sampai, bukan berarti tidak akan tercapai. Setiap manusia mempunyai perjalanannya masing-masing. Hidup ini bukan sebuah kompetisi.

Jadi tetap berjuang dan semangat.

PERSEMBAHAN

**Dengan rasa syukur kepada Allah SWT, kupersembahkan karya kecilku
untuk orang-orang yang sangat aku sayangi**

Kedua Orang Tuaku

Bapak Sujono & Ibu Kasih

“Terimakasih untuk segala do’a, dukungan, dan usaha yang selalu diberikan demi keberhasilan dan kesuksesan putrinya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai Sarjana Fisika”

Kedua Adikku

Echa May Diana & M.Ilham Al Affu

“Terimakasih untuk segala do’a dan dukungan, telah menghibur dan menjadi motivasi untuk terus menjadi lebih baik. Selalu ada dalam segala suasana suka dan duka serta kebersamaan tanpa batas selama ini”

Keluarga Besar & Sahabat Sahabat Terdekat

“Terimakasih atas segala dukungannya yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan dalam keadaan suka maupun duka”

Rekan-rekan seperjuangan “FISIKA FMIPA UNILA 2019”

Almamater Tercinta

“Universitas Lampung”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, yang telah memberikan nikmat kesehatan, kelancaran dan berkat karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan proposal penelitian yang berjudul “**Rancang Bangun Mesin *Computer Numerical Control (CNC) Router 4 Axis Menggunakan Board USB Mach 3 dan Motor Stepper Nema-23 dengan Aplikasi Mach 3***” yang merupakan syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Instrumentasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Skripsi ini membahas tentang rancang bangun mesin CNC *Router 4 axis* yang menggunakan 4 sumbu sebagai penggerak mesin dan kemudian digunakan untuk memotong bahan seperti akrilik dan kayu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyajian skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritikan dan saran yang membangun guna dalam penulisan berikutnya yang lebih baik. Semoga skripsi ini bermanfaat dan dapat menjadi rujukan untuk penelitian selanjutnya.

Bandar Lampung, 12 Desember 2023

Amapel Odenia

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberi kesehatan, nikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Rancang Bangun Mesin *Computer Numerical Control* (CNC) Router 4 Axis Menggunakan Board USB Mach 3 dan Motor Stepper Nema-23 dengan Aplikasi Mach 3”**. Terwujudnya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Si. sebagai Pembimbing utama yang telah banyak memberi bimbingan, motivasi, nasihat serta ilmunya dalam penyelesaian skripsi.
2. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. sebagai Pembimbing Kedua dan selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan saran, masukan arahan dalam penulisan skripsi ini.
3. Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si. sebagai dosen penguji yang telah memberi masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing Akademik yang memberikan masukan-masukan serta nasehat selama masa studi di Jurusan Fisika.
6. Teristimewa kedua orang tuaku, Bapak Sujono dan Ibu kasih yang selalu mendoakan, memberikan semangat, semua pengorbanan dan dukungan baik berupa materi ataupun moril kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Kedua adikku, Echa Maydiana Salsabila dan M. Ilham Al Affu yang telah menghibur, memberikan semangat dan mendoakan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

8. Teman-teman seperjuangan saya Ida, Lis Dwi, Hania, Fhidea, Aulia, Miranti yang selalu ada disaat senang dan susah selama dibangku perkuliahan serta telah menjadi kawan diskusi yang baik.
9. Sahabat-sahabat saya Nanda, Deva, Devi, Nevi, dan Tiara yang telah menemani, memberikan semangat, selalu ada disaat senang maupun sedih, dan menjadi tempat bercerita keluh kesah kehidupan.
10. Teman-teman satu tim project CNC Intan dan kak Hesti yang telah membersamai dan berjuang bersama-sama.
11. Kakak-kakakku kak Chiesa, atu Dwina, atu Laras, dan bang Wahyu yang telah memberikan semangat, mendengarkan keluh kesah serta membantu selama mengerjakan skripsi.
12. Teman-teman Pimpinan UKM Penelitian Unila 2021 dan 2022.
13. Seluruh mahasiswa/i Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung angkatan 2019, dan teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.
14. Teruntuk diri saya sendiri, terimakasih telah berjuang keras dan berusaha sejauh ini. Sudah mampu bertahan dan mengendalikan diri dari berbagai tekanan diluar keadaan dan tidak pernah memutuskan untuk menyerah sesulit apapun proses dalam penyusunan skripsi ini dengan menyelesaikan sebaik dan semaksimal mungkin. Walaupun terlihat lambat, tetapi ini merupakan pencapaian yang patut dibanggakan untuk diri sendiri.

Akhir kata, penulis haturkan doa dan panjatkan rasa syukur kepada Allah SWT, semoga Allah SWT memberikan imbalan yang berlipat atas bantuan semua pihak dan semoga selalu dimudahkan langkah kita yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini

Bandar Lampung, 12 Desember 2023

Amapel Odenia

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
HALAMAN JUDUL	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Terkait	6
2.2 <i>Computer Numerical Control (CNC)</i>	11
2.2.1 Mesin CNC Router.....	11
2.2.2 Mesin CNC Laser.....	13
2.2.3 Mesin CNC Plasma <i>Cutter</i>	14
2.3 <i>Driver</i> CNC	14

2.4	USB Mach 3 <i>Breakout Board</i>	15
2.5	<i>Driver Motor Stepper TB6600</i>	16
2.6	<i>Motor Stepper</i>	18
2.7	<i>Software Mach 3</i>	19
2.8	<i>Software Aspire</i>	22
2.9	Uji Kalibrasi	23
III. METODE PENELITIAN		
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2	Alat dan Bahan	25
3.3	Prosedur Penelitian	27
3.3.1	Desain dan Perancangan Mesin	30
3.3.2	Skematik Rangkaian Sistem Kontrol <i>Board Mach 3</i>	33
3.3.3	Pengujian Mesin CNC <i>Router 4 axis</i>	35
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		
4.1	Realisasi Sistem Mekanik Mesin CNC	38
4.2	Kalibrasi Mach 3 pada Mesin CNC <i>Router 4 Axis</i>	46
4.3	Pengujian Mesin CNC <i>Router 4 Axis</i>	48
4.3.1	Pengujian Sumbu X	48
4.3.2	Pengujian Sumbu Y ₁ dan Y ₂	52
4.3.3	Pengujian Sumbu Z (Kedalaman)	56
4.4	Realisasi Mesin CNC <i>Router 4 Axis</i>	59
V. SIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Simpulan	63
5.2	Saran	64
DAFTAR PUSTAKA		

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Grafik Defleksi Poros pada Sumbu x.	7
Gambar 2.2 Skematik Rangkaian Sistem Kontrol CNC Milling 3 Axis.....	8
Gambar 2.3 Skematik Rangkaian <i>Limit Switch</i> dan <i>Emergency Stop</i> pada CNC Milling 3 Axis	9
Gambar 2.4 Grafik akurasi sumbu.....	10
Gambar 2.5 Mesin CNC Router.	12
Gambar 2.6 Board CNC USB Mach 3.	16
Gambar 2.7 Pin Layout Driver Motor TB6600.....	17
Gambar 2.8 Konstruksi Motor Stepper.	19
Gambar 2.9 Motor Stepper Nema-23.	19
Gambar 2.10 Menu Tampilan Program Run Mach 3	21
Gambar 2.11 Tampilan <i>Toolbar Config</i> Mach 3	22
Gambar 2.12 Tampilan Menu <i>Software Aspire</i>	23
Gambar 2.13 Kalibrasi Motor Stepper.	24
Gambar 3.1 Flowchart perancangan mesin CNC.....	28
Gambar 3.2 Diagram Blok Perancangan Sistem.	29
Gambar 3.3 Desain mesin CNC Router 4 axis.	31
Gambar 3.4 Desain mesin CNC Router 4 axis beserta Kotak Komponen Elektronik.....	32
Gambar 3.5 Rangkaian Sistem Kontrol Mesin CNC.....	33
Gambar 3.6 Grafik Hasil Pengujian Mesin CNC Router 4 Axis.	37

Gambar 4.1 Realisasi mesin CNC <i>Router 4 axis</i>	38
Gambar 4.2 Bagian mekanik statis mesin CNC <i>Router 4 axis</i>	39
Gambar 4.3 Sbr12 <i>linier rail</i> sumbu Y_1	40
Gambar 4.4 Sbr12 <i>linier rail</i> sumbu Y_2	40
Gambar 4.5 Sbr12 <i>linier rail</i> sumbu X.....	40
Gambar 4.6 <i>Lead screw</i> sumbu Z.....	41
Gambar 4.7 <i>Holder bracket rail</i>	41
Gambar 4.8 <i>Bracket</i> tipe nema 23	41
Gambar 4.9 <i>Bracket spindle</i>	42
Gambar 4.10 Area kerja mesin	42
Gambar 4.11 Plat sumbu X.....	42
Gambar 4.12 <i>Timing Belt</i>	43
Gambar 4.13 Kerangka mesin	43
Gambar 4.14 <i>Flexible coupling</i>	43
Gambar 4.15 Mekanik dinamis mesin CNC <i>Router 4 axis</i> tampak depan.....	44
Gambar 4.16 Mekanik dinamis mesin CNC <i>Router 4 axis</i> tampak samping.	44
Gambar 4.17 Kotak komponen Kontroler.	45
Gambar 4.18 Pengaturan Kalibrasi Mach 3.....	47
Gambar 4.19 Hasil uji sumbu X.....	49
Gambar 4.20 Grafik hubungan nilai <i>input</i> terhadap nilai hasil sumbu X.....	51
Gambar 4.21 Hasil uji sumbu Y_1 dan Y_2	53
Gambar 4.22 Grafik hubungan nilai <i>input</i> terhadap nilai hasil sumbu Y_1	55
Gambar 4.23 Hasil uji sumbu Z	57
Gambar 4.24 Grafik hubungan nilai <i>input</i> terhadap nilai hasil sumbu Z.....	58
Gambar 4.25 Grafik uji persegi panjang dengan variasi <i>Feedrate</i>	60
Gambar 4.26 Grafik Hubungan <i>Feedrate</i> dengan Waktu Proses	61

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi <i>Driver</i> Motor TB6600.....	18
Tabel 3.1 Alat – alat yang digunakan.....	26
Tabel 3.2 Bahan – bahan yang digunakan.....	26
Tabel 3.3 Perangkat lunak yang digunakan.....	27
Tabel 3.4 Data pengujian pergerakan sumbu X pada mesin CNC <i>Router 4 axis</i> . 35	
Tabel 3.5 Data pengujian pergerakan sumbu Y ₁ dan Y ₂ pada mesin CNC <i>Router 4 axis</i>	35
Tabel 3.6 Data pengujian pergerakan sumbu Z (kedalaman) pada mesin CNC <i>Router 4 axis</i>	36
Tabel 3.7 Hasil bentuk persegi panjang	37
Tabel 4.1 Spesifikasi mesin CNC <i>Router 4 axis</i>	46
Tabel 4.2 Data Uji Sumbu X	50
Tabel 4.3 Data Uji Sumbu Y ₁ dan Y ₂	54
Tabel 4.4 Data Uji Sumbu Z	57
Tabel 4.5 Data pengukuran persegi panjang dengan variasi <i>Feedrate</i>	60

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan dunia instrumentasi dan sistem kontrol yang begitu pesat saat ini telah melahirkan konsep-konsep baru sejalan dengan ditemukannya komponen elektronik yang berkemampuan tinggi sebagai perangkat keras (*hardware*) dan diikuti dengan perkembangan perangkat lunak (*software*). Sistem kontrol yang diartikan sebagai suatu sistem untuk mengendalikan, memerintah dan mengatur keadaan yang menghasilkan nilai tertentu sebagai keluarannya (Miftah, 2013). Sistem kontrol memberikan banyak keuntungan yang akan meningkatkan kinerja suatu sistem diantaranya dapat menekan biaya produksi, meningkatkan kualitas produk, dan efisiensi terhadap waktu (Firsa, 2015). Perkembangan sistem kontrol dan instrumentasi yang sudah dimulai sejak tahun 1930 hingga saat ini, dipengaruhi oleh dua faktor yaitu kebutuhan pemakai dan perkembangan teknologi (Hasan, 2021). Perkembangan teknologi sistem kontrol otomatis berbasis komputer pada beberapa mesin perkakas telah menghasilkan mesin perkakas yang mampu menangani berbagai pekerjaan yang rumit dalam jangka waktu yang singkat (Hasibuan *et al.*, 2019) dan digunakan sebagai alat untuk mempermudah kegiatan manusia dengan penggunaan teknologi komputer ke dalamnya.

Mesin *Computer Numerical Control* atau yang disingkat dengan mesin CNC merupakan salah satu perkembangan teknologi mesin perkakas dengan sistem kontrol yang dioperasikan secara otomatis oleh perintah yang diprogram secara abstrak dan disimpan di media penyimpanan, hal ini berlawanan dengan kebiasaan sebelumnya dimana mesin perkakas biasanya dikontrol dengan putaran tangan atau otomatis sederhana menggunakan *Computer Aided Manufacturing* (CAM) (Muchlis

et al., 2021). Perkembangan mesin CNC saat ini merupakan pembaruan mesin perkakas yang telah ada sebelumnya yang kurang efektif dari segi waktu dan biaya (Imran *et al.*, 2019). Mesin CNC memiliki beragam jenis dilihat dari media yang digunakan, diantaranya: mesin CNC Plasma (media laser atau api), mesin CNC Router (media cutter atau mata bor), dan lain-lain (Anrinal *et al.*, 2022). Mesin CNC Router diartikan sebagai penggabungan teknologi CNC dengan mesin Router (Sujadi, 2019). CNC difungsikan untuk mengontrol pergerakan proses pemotongan dan Router akan difungsikan sebagai pemutar alat potong. Mesin CNC Router memanfaatkan putaran mata potong yang berputar pada sumbunya untuk melakukan pekerjaan menggali (*milling*), mengukir (*engraving*), dan memotong (*cutting*) (Ma'arif *et al.*, 2021).

Sistem kerja teknologi mesin CNC lebih sinkron antara komputer dan mekanik, sehingga bila dibandingkan dengan mesin perkakas yang sejenis maka mesin CNC lebih teliti, lebih tepat, dan lebih fleksibel (Amala dan Widyanto, 2014). Sistem kontrol numerik pada mesin CNC dapat berjalan dikarenakan adanya seperangkat-seperangkat komponen sistem kontrol yang mendukung operasional mesin yang selanjutnya digabungkan sedemikian rupa dengan kabel-kabel sehingga membentuk perangkat elektronik tertentu (Jufrizaldy, 2020). Pengoperasian pada mesin CNC sangat sederhana yang dapat memproduksi dengan skala besar dan dapat memproduksi komponen secara masal (Hasibuan *et al.*, 2019). Dengan mesin CNC variasi dimensi dapat diperkecil atau bahkan dihapus, sehingga produk objek cacat yang dihasilkan dapat diminimalisir. Produk objek tanpa cacat (*zero defect*) hanya bisa diimplementasikan jika semua fungsi mesin CNC dapat dikendalikan secara akurasi dan presisi (Rahmi *et al.*, 2021).

Dalam mengatasi permasalahan akurasi dan presisi pada produk yang dihasilkan oleh mesin, beberapa peneliti telah melakukan penelitian mengenai rancang bangun mesin CNC Router dengan menggunakan teknologi motor *stepper* dan mikrokontroler. Mikrokontroler yang sering digunakan dalam pembuatan mesin adalah USB Board Mach 3 sebagaimana yang dilakukan Elmiawan *et al.* (2022) dalam penelitiannya mengenai akurasi mesin CNC Router berbasis Mach 3 dengan kalibrasi menggunakan *software* Mach 3. Setiawan *et al.* (2020) telah melakukan

penelitian tentang rancang bangun mesin CNC *Router*. Mesin yang dibuat bekerja baik sesuai desain meskipun belum dilakukan uji coba mengenai presisi dan akurasi sumbu. Harrizal *et al.* (2017) melakukan penelitian mengenai rancang bangun sistem kontrol mesin CNC Milling 3 *axis* menggunakan *close loop system*. Dari sistem kontrol mesin yang telah dibuat, diperoleh sebuah rancangan skematik sistem kontrol mesin CNC yang mampu menggerakkan mesin searah tiga sumbu yaitu X, Y, dan Z, tetapi masih menggunakan CNC *breakoutboard ST-V3* yang hanya bisa menggunakan *parallel port* komputer DB25. Selain USB *board Mach 3*, penelitian yang sama juga dilakukan dengan mikrokontroler lain yaitu Arduino Uno R3. Hasil penelitian dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3 menunjukkan tidak memiliki tingkat kesalahan yang signifikan dalam hasilnya namun dalam waktu pengerjaan dan jumlah produksi yang dihasilkan oleh mesin masih rendah.

Berdasarkan permasalahan diatas, dipandang perlu untuk melakukan penelitian mengenai rancang bangun sistem kontrol mesin CNC *Router 4 axis* dengan akurasi dan presisi yang tinggi. Mesin CNC *Router* yang akan dibuat berukuran 50 cm x 70 cm x 15 cm. Dalam penelitian ini kontroler yang akan digunakan adalah *board USB Mach 3* karena dapat digunakan hingga 4 *axis* dan dapat mengontrol CNC secara *real-time* yang terhubung dengan *software Mach 3*. Motor *stepper* yang akan digunakan yaitu jenis motor *stepper* Nema-23 yang dapat mengontrol dengan sangat tepat putaran porosnya membuat gerakan presisi dan *driver* motor seri TB6600 karena memiliki kapasitas *peak current* yang lebih besar sehingga mampu mengangkat motor *stepper* Nema-23. Setelah komponen dirangkai, dilakukan uji akurasi sumbu X, Y₁, Y₂ dan Z dengan *software Mach 3*. Setelah mesin berhasil dioperasikan dan mendapatkan nilai akurasi, dilakukan pengambilan data dan dilakukan analisis hasil.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana proses perancangan suatu mesin *Computer Numerical Control* (CNC) *Router 4 axis* menggunakan modul *board* USB Mach 3, *driver* motor TB6600 dan motor *stepper* Nema-23 dengan aplikasi Mach 3?
2. Bagaimana cara mengetahui karakteristik instrumentasi nilai akurasi dan presisi pada mesin yang telah dibuat?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang suatu mesin *Computer Numerical Control* (CNC) *Router 4 axis* menggunakan modul *board* USB Mach 3, *driver* motor TB6600 dan motor *stepper* Nema-23 dengan aplikasi Mach 3.
2. Mengetahui karakteristik instrumentasi nilai akurasi dan presisi pada mesin yang telah dibuat.

1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan tidak meluas dan menyimpang dari tujuan, penulis membatasi masalah yang akan dibahas pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. CNC *Router 4 axis* menggunakan sistem gerak dengan sumbu X sebagai penggerak kanan kiri, sumbu Y_1 dan Y_2 sebagai penggerak maju mundur, dan sumbu Z sebagai penggerak naik turun (kedalaman).
2. Perancangan sistem kontrol mesin CNC *Router 4 axis* menggunakan *Board* USB Mach 3, motor *stepper* Nema-23 dan modul *driver* motor TB6600.
3. Sistem kontrol mesin CNC *Router 4 axis* menggunakan perangkat lunak Mach 3 dan perangkat lunak Aspire untuk mengubah gambar menjadi *G-Code*.
4. Pengujian sistem kontrol dari rancang bangun yang telah dibuat dengan menguji akurasi dan presisi pergerakan sumbu mesin menggunakan jangka sorong.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan pengetahuan tentang perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) terutama di dunia sistem kontrol.
2. Memberikan pengetahuan tentang mesin CNC *Router 4 axis*.
3. Dapat dijadikan sebagai media pembelajaran dalam pengembangan riset dan praktikum lembaga pendidikan perguruan tinggi.
4. Sebagai referensi peneliti dalam melakukan penelitian selanjutnya.

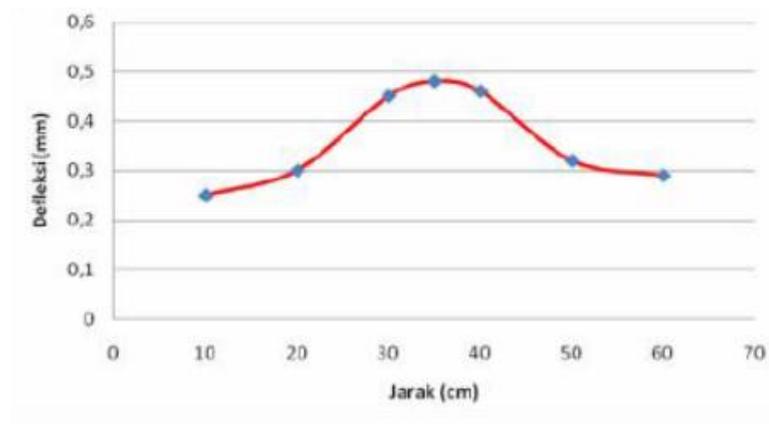
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

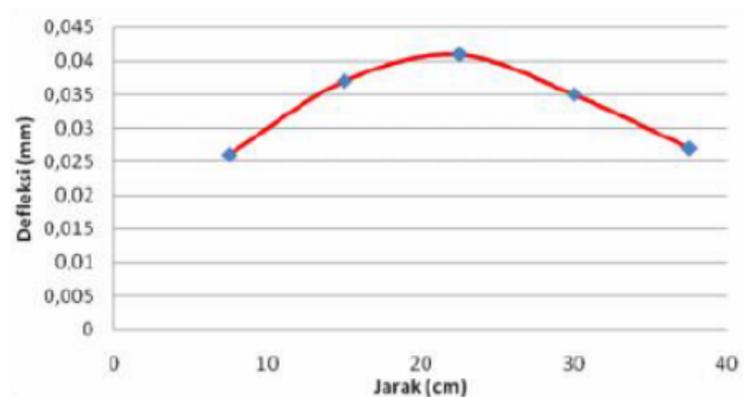
Banyak peneliti yang telah melakukan percobaan dalam perancangan dan pembuatan mesin CNC dengan menggunakan berbagai mikrokontroler dan sumbu penggerak. Beberapa diantaranya digunakan untuk membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

Pramono *et al.* (2012) dengan penelitian yang berjudul “rancang bangun CNC Router 3 Axis untuk keperluan praktikum CAD (*Computer Aided Design*) / CAM (*Computer Aided Manufacturing*)” dapat disimpulkan bahwa *prototype* yang dihasilkan adalah sebuah mesin CNC *Milling* dengan 3 *axis* dan memiliki dimensi dengan panjang 0,85 m, lebar 0,60 m, dan tinggi 0,60 m, dengan panjang langkah pada sumbu x sebesar 0,5 m, pada sumbu y sebesar 0,3 m, dan pada sumbu z sebesar 0,1 m. Jenis sambungan yang digunakan yaitu baut dan scrup. Tebal rangka sebesar 0,02 m dengan jenis motor yang digunakan untuk menggerakkan ulir transmisi adalah motor *stepper* dan perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk memasukkan perintah adalah Mach 3. Pada penelitian ini diperoleh data-data perhitungan yang telah dilakukan yaitu daya Router minimal yang dapat digunakan adalah 15.924 rpm, maka dipilihlah Router kayu dengan daya 450 watt dan kecepatan putaran adalah 30.000 rpm.

Dari hasil perhitungan teoritis defleksi poros diperoleh bahwa defleksi maksimal poros pada sumbu x dan y adalah 0,28 mm dan 0,022 mm sedangkan hasil pengujian defleksi poros pada sumbu x dan y adalah 0,48 mm dan 0,041 mm. Mesin CNC mini Router 3 axis ini mampu digunakan untuk segala jenis kayu dengan tegangan geser maksimum 124 kg/cm². Pada **Gambar 2.1** adalah nilai defeksi sumbu x dan y.



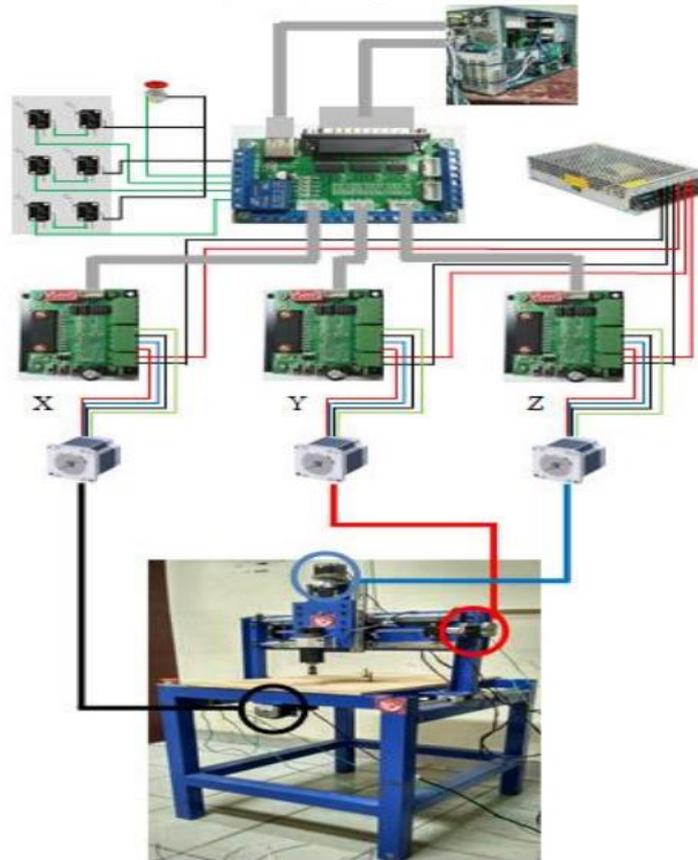
(a)



(b)

Gambar 2.1 Grafik Defleksi Poros pada Sumbu x (a) Grafik Defleksi Poros pada Sumbu y (b) (Pramono *et al.*, 2012).

Harrizal *et al.* (2017) melakukan penelitian mengenai rancang bangun sistem kontrol mesin CNC *Milling 3 axis* menggunakan *close loop system*. Dari sistem kontrol mesin yang telah dibuat, diperoleh sebuah rancangan skematik sistem kontrol mesin CNC yang mampu menggerakkan mesin searah tiga sumbu yaitu X, Y, dan Z. **Pada Gambar 2.2** diperlihatkan hasil rangkaian skematik sistem kontrol pada CNC.

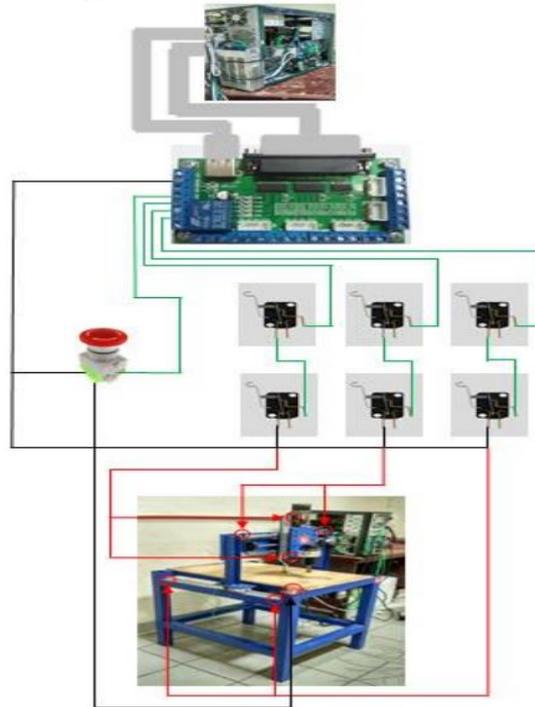


Gambar 2. 2 Skematik Rangkaian Sistem Kontrol CNC *Milling 3 Axis* (Harrizal *et al.*, 2017).

Dalam **Gambar 2.2** diperlihatkan rangkaian sistematis sistem kontrol CNC 3 axis dengan beberapa komponen penting sebagai penyusunnya diantaranya adalah komputer, *breakout board*, motor driver, motor stepper, power supply, limit switch, dan *emergency stop*. Kemudian digunakan sistem *interface* berbasis aplikasi program Mach 3 agar sistem kontrol berjalan dengan semestinya. Untuk menyesuaikan perangkat kontrol yang ada, dilakukan pengaturan *port* dan masukan sinyal pada *interface*, agar setiap perintah yang berasal dari komputer dibaca dengan baik oleh aktuator.

Kemudian dilakukan juga rancangan skematik rangkaian *limit switch* dan *Emergency Stop* pada CNC *milling 3 axis*. *Limit switch* yang digunakan berfungsi sebagai pemberi sinyal *feedback* kepada komputer sedangkan *Emergency stop* atau E-Stop berfungsi sebagai tombol darurat ketika terjadi kesalahan pada proses

pengerjaan. Skematik rangkaian *limit switch* dan *emergency stop* diperlihatkan pada **Gambar 2.3**

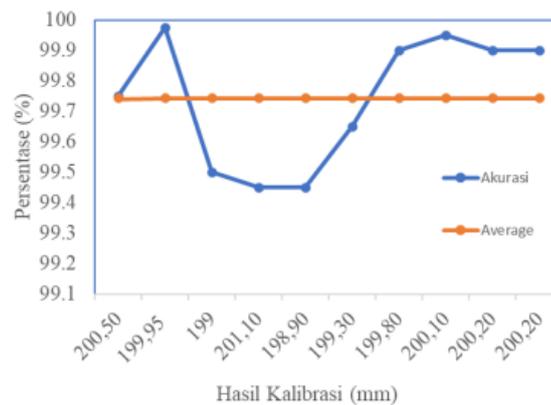


Gambar 2. 3 Skematik Rangkaian *Limit Switch* dan *Emergency Stop* pada CNC Milling 3 Axis (Harrizal *et al.*, 2017).

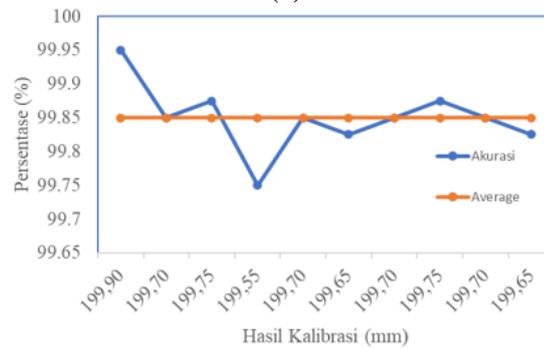
Pada **Gambar 2.3** diperlihatkan *limit switch* akan bekerja ketika mengalami sentuhan dan terdengar bunyi “klik”. Kemudian *limit switch* akan memberikan sinyal perintah kepada komputer bahwa mesin bergerak mencapai batas kerja maksimal yang kemudian akan diteruskan kepada motor *stepper* untuk bergerak kembali ke posisi awal pengerjaan yaitu pada titik koordinat 0,0,0. Dengan menggunakan sensor *limit switch*, didapatkan batas kerja maksimal pada sumbu x adalah 390 mm, sumbu y adalah 340 mm dan pada sumbu z adalah 98 mm. Sedangkan *emergency stop* akan menyampaikan informasi kepada komputer bahwa adanya kesalahan yang terjadi, kemudian komputer akan memberi perintah kepada *stepper* motor untuk berhenti bergerak. Dimana rangkaian kerja tersebut disebut juga sebagai rangkaian kerja masukan.

Elmiawan *et al.* (2022) melakukan penelitian yaitu akurasi mesin CNC Router low budget berbasis Mach 3. Tahapan proses pembuatan mesin CNC Router meliputi

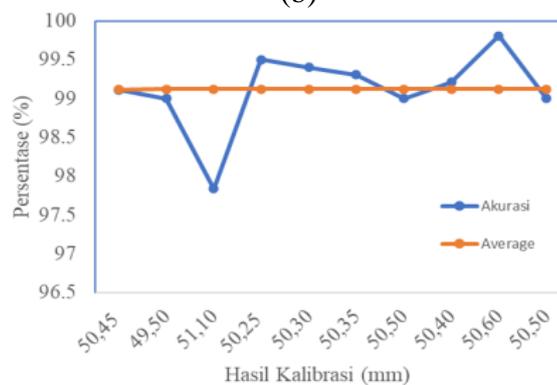
perancangan dan menghitung rancangan, memilih dan membuat komponen, mengecek fungsi dan kesesuaian komponen, merakit bagian mekanis dan elektrik, pengambilan data dan pengujian mesin serta pembuatan standar kerja pemakaian. Mesin CNC yang telah dibuat mempunyai dimensi luas area kerja 80 cm x 80 cm dan dibuat dengan dikendalikan oleh program CNC menggunakan aplikasi Mach 3. Pada **Gambar 2.4** adalah nilai akurasi yang diperoleh pada sumbu X, Y, dan Z.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.4 Grafik akurasi sumbu (a) sumbu X, (b) sumbu Y, (c) sumbu Z (Elmiawan *et al.*, 2022).

Pengujian dilakukan dengan menggunakan ukuran yang diperintahkan yaitu 200 mm. Hasil nilai pengujian pada mesin yang telah dibuat dapat bekerja dengan akurasi pada sumbu X adalah 99,85%, pada sumbu Y sebesar 99,74. Sedangkan pengukuran kedalaman dilakukan untuk mengetahui tingkat kepresisian pada sumbu Z dengan tingkat presisi sebesar 99,12%.

2.2 Computer Numerical Control (CNC)

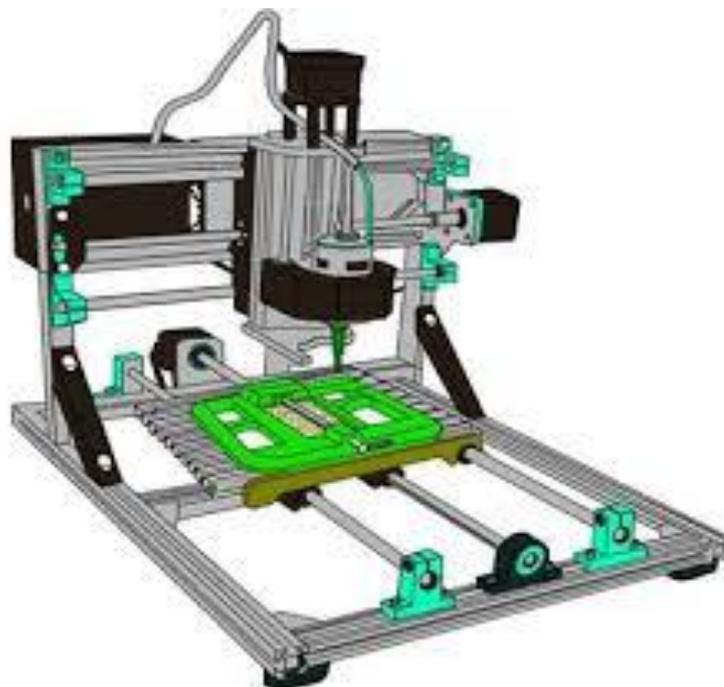
Mesin *Computer Numerical Control* atau yang biasa disebut mesin CNC merupakan sebuah istilah yang digunakan hingga sistem operasinya dikontrol dengan memakai sebuah komputer internal. Teknologi CNC adalah metode yang terbaik saat ini untuk memenuhi produk pasar terhadap keperluan akan komponen manufaktur, dikarenakan ketelitian dan efisiensi yang dimilikinya (Firsa *et al.*, 2015). Secara umum mesin CNC adalah sebuah mesin yang dikendalikan oleh kode angka-angka dan huruf yang secara otomatis menjalankan operasi manufacturing menurut perintah yang tersusun dalam kode angka (NC Code).

Teknologi CNC adalah metode yang terbaik saat ini untuk memenuhi produk pasar terhadap keperluan akan komponen manufaktur, disebabkan karena ketelitian dan efisiensi yang dimilikinya. Sistem kerja teknologi CNC lebih sinkron antara komputer dan mekanik, sehingga bila dibandingkan dengan mesin perkakas yang sejenis, maka keandalan mesin CNC lebih teliti, lebih tepat, dan lebih fleksibel (Pratama *et al.*, 2022). Keandalan dari mesin CNC tidak terlepas dari komponen-komponen pendukungnya, seperti operator (*brainware*), perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Ketika komponen itu harus saling mendukung untuk memperoleh hasil kerja yang memuaskan (Syahriza, 2015). CNC beragam jenis dilihat dari media yang digunakan, diantaranya: CNC Router (media *cutter* atau mata bor), CNC Plasma (media laser atau api), dan lain-lain (Anrinal *et al.*, 2022).

2.2.1 Mesin CNC Router

CNC Router merupakan alat yang banyak digunakan dalam proses pemotongan (*cutting*) maupun pengukiran (*engraving*) dalam industri skala kecil maupun

menengah atas. Mesin CNC *Router* adalah mesin kerja yang dikontrol dengan komputer yang menggunakan bahasa numerik (angka dan huruf) (Budhi *et al.*, 2021) yang menghasilkan komponen unik yang presisi dan bagian yang kompleks (Firdaus dan Yuhas, 2022). Mesin CNC *Router* menggabungkan teknologi CNC dan *Router, cutter* yang mampu memotong bentuk-bentuk lembaran kayu atau material lunak lainnya yang memiliki bentuk rumit dan membutuhkan ketelitian dalam pembuatan. Gabungan ini kemudian membentuk sebuah mesin pemotong yang dikontrol oleh komputer dengan menggunakan mesin *Router* untuk memotong berbagai bahan seperti kayu, komposit, alumunium, baja lunak, kaca akrilik, plastik dan busa dengan mengadopsi dari teknologi CNC. Pergerakan pemotongan dan lintasan *cutter* untuk sumbu X, Y, dan Z serta sumbu A dan B yang berasal dari program komputer berdasarkan gambar ataupun desain kontur yang telah dibuat (Salam *et al.*, 2019). Contoh mesin CNC *Router* ditunjukkan pada **Gambar 2.5**



Gambar 2.5 Mesin CNC *Router* (Nayorama, 2016).

Alat utama yang digunakan pada mesin CNC *Router* yaitu pisau yang berbentuk dengan mirip mata bor. Pisau akan berputar dengan kecepatan yang telah diatur dan akan memakan kayu hingga berbentuk benda kerja yang diinginkan. Berdasarkan

bentuk dan fungsinya pisau *Router* dibedakan menjadi empat jenis pisau. Pisau pembuat alur merupakan jenis pisau yang digunakan untuk membuat bermacam-macam alur dan dapat digunakan untuk membuat sambungan. Pisau pembentuk kayu merupakan jenis pisau yang digunakan untuk membentuk tepian kayu. Pisau perata pinggir digunakan untuk meratakan pinggiran kayu dan pisau pembuat alur kecil yang digunakan sebagai pembentuk berbagai macam lekukan hias pada tepian kayu (Nayorama, 2016).

Mesin CNC *Router* ini memiliki tiga fungsi atau kegunaan:

1. Fungsi yang pertama adalah memotong atau *cutting* yaitu memotong sesuai dengan keinginan yang mengoperasikannya menggunakan komputer. Maka kesalahan dalam pemotongan bisa diminimalisir.
2. Kegunaan yang kedua adalah menggravir atau *engraving*. Sehingga dengan menggunakan alat bisa mendekorasi sedemikian rupa agar terlihat lebih bagus dan juga terkesan lebih unik. Sehingga produk yang dihasilkan akan sangat memuaskan dan sangat indah.
3. Setelah memotong dan juga menggravir, kegunaan lain yang dimiliki oleh mesin *Router* berbasis CNC adalah *marking* atau memberi marka. Maksudnya disini adalah memberikan tanda-tanda pada kayu yang akan digunakan tersebut. Sehingga dengan begitu sentuhan *finishing* akan sesuai dan rapi.

2.2.2 Mesin CNC Laser

CNC *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Laser) merupakan alat yang memiliki fungsi untuk mengukir atau mencetak berbagai tulisan dan kaligrafi secara otomatis berdasarkan media yang digunakan seperti Akrilik, Fiber, Aluminium dan kayu (Muchlis *et al.*, 2021). Mesin CNC laser mampu melakukan 2 jenis proses permesinan yaitu potong (*cutting*) dan ukir (*engraving*). Proses *cutting* adalah proses yang digunakan untuk memotong material, sedangkan proses *engraving* adalah proses yang digunakan untuk menggores permukaan material sehingga hasil proses menjadi seperti ukiran (Marcelina *et al.*, 2021). Mesin CNC laser merupakan suatu teknologi yang menggunakan laser untuk memotong material. Mesin CNC laser memiliki prinsip kerja dengan cara mengarahkan laser

berkekuatan tinggi untuk memotong material dan digunakan komputer untuk mengarahkan. Mesin CNC laser banyak diaplikasikan pada industri manufaktur.

2.2.3 Mesin CNC Plasma Cutter

Mesin CNC plasma *cutter* merupakan mesin yang digunakan untuk memotong logam atau kayu secara 2 dimensi. CNC plasma *cutter* menggunakan obor plasma (plasma *torch*) untuk menembus lembaran kayu atau logam. Daya yang dibutuhkan oleh CNC plasma *cutter* tidak sebanyak daya yang digunakan pada CNC *Router*. Plasma adalah suatu bentuk fase zat ke-4 setelah fase padat, cair, dan gas. Jika ditambahkan kalor, es akan berubah wujud dari padat ke cair, dan jika diberikan kalor berlebih maka zat cair tersebut akan berubah menjadi uap. Jika uap tersebut ditambahkan kalor lagi maka akan berubah menjadi wujud plasma. Tegangan listrik yang tinggi diperlukan untuk memberikan gaya pada elektron-elektron arus listrik untuk dapat melalui jenis logam yang ber hambatan tinggi tersebut, dimana akibat dari penambahan tegangan listrik tersebut menjadi panas (Rahman *et al.*, 2019).

2.3 Driver CNC

Port paralel atau yang bisa disebut dengan *Line Print Terminal* (LPT) digunakan sebagai komunikasi mesin CNC dengan komputer. Paralel port memiliki kelebihan dalam sebuah komunikasi antara komputer dengan perangkat lain yang dikontrol dengan menggunakan komputer yaitu dalam satu waktu port paralel dapat mengirimkan sekaligus menerima data dalam waktu yang bersamaan. Penggunaan port paralel akan mendapatkan data komunikasi yang *real time*. Selain penggunaan port paralel, pengoperasian mesin CNC dapat menggunakan platform lain yaitu mikrokontrol yang dapat dimanfaatkan sebagai kontrol utama mesin CNC dengan menggunakan *Universal Serial Bus* (USB) yang dimana lebih fleksibel dalam pengoperasiannya.

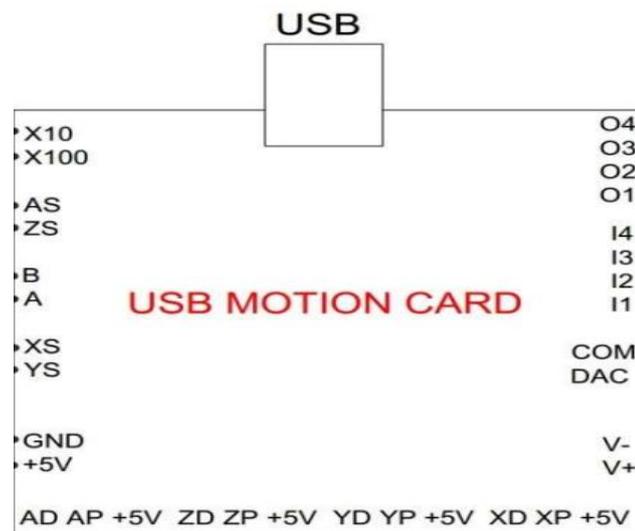
Penggunaan USB sebagai komunikasi dapat dipastikan penggunaan komputer dengan spesifikasi tinggi tidak akan menjadi masalah, dengan beberapa kelebihan yaitu *host/sender* dan proses desain dilakukan pada komputer yang sama. Akan tetapi seperti yang diketahui bahwa komunikasi USB jauh lebih cepat dan *real time*

dibandingkan dengan komunikasi Paralel (Nugroho *et al.*, 2020). Mach CNC Module USB adalah sebuah perangkat keras untuk mengontrol mesin CNC dengan cara mengelola data *G-Code* dari komputer dan memberikan sistem proteksi. Sedangkan Mach 3 yang bekerja dengan komunikasi paralel untuk memastikan kecepatan data yang dikirim dan diterima secara real time (Febryanto dan Kartikasari, 2022).

2.4 USB Mach 3 Breakout Board

Breakout board adalah kontroler yang berfungsi sebagai penghubung sinyal dari data komputer, baik masukan maupun keluaran kepada aktuator. *Breakout board* merupakan komponen utama sistem kontrol yang menjadi otak pada CNC. *Breakout board* digunakan sebagai penghubung sinyal dari data komputer menuju *relay* atau *driver*, atau juga menghubungkan sinyal masukan dari luar agar dapat terbaca pada komputer/laptop. *Breakout board* berfungsi untuk menerjemahkan perintah dalam bentuk *G-Code* dan selanjutnya disampaikan kepada aktuator mesin. Ada beberapa jenis *breakout board* yang biasa digunakan dan tersedia dipasaran, baik itu yang berbasis Arduino maupun berbasis Mach 3 yang digunakan sebagai sistem kontrol.

Board CNC USB Mach 3 merupakan salah satu kontroler *breakout board* yang digunakan untuk menjalankan Mach 3 melalui port USB standar pada komputer atau laptop. *Board CNC USB Mach 3* memiliki kelebihan diantaranya kecepatan transfer data yang tinggi yaitu 100 kHz sehingga sangat stabil jika digunakan saat mengirimkan data *G-Code* ke *driver* motor *stepper*. Pada **Gambar 2.6** adalah gambar *Board CNC USB Mach 3* beserta skematiknya.



Gambar 2.6 Board CNC USB Mach 3 (Anonim, 2020).

Pada **Gambar 2.6** Board USB Mach 3 memiliki beberapa port yang terhubung ke masing-masing port seperti PC, *stepper* motor 4 axis, *input* device, USB connector dan sumber tenaga (*power supply*). Board USB Mach 3 memiliki fungsi dan fitur diantaranya sebagai berikut:

1. Mendukung kontrol hingga 4 axis. Sumbu ke-4 dapat diatur sebagai *slave axis* (sumbu pendukung).
2. Pulsa keluaran 100K.
3. USB *interface* yang cocok digunakan untuk semua jenis laptop.
4. Mendukung sistem pada windows XP, windows 7 dan windows 10.
5. Mendukung *homing* otomatis (kembali pada titik nol).
6. Mendukung *automatic tool setting*, *emergency stop*, *spindle control* dan *limit switch*.
7. Menyediakan 4 saluran dengan *input* sinyal digital terisolasi optocoupler, 4 saluran dengan *output relay*, dan 12 *input* sinyal digital.

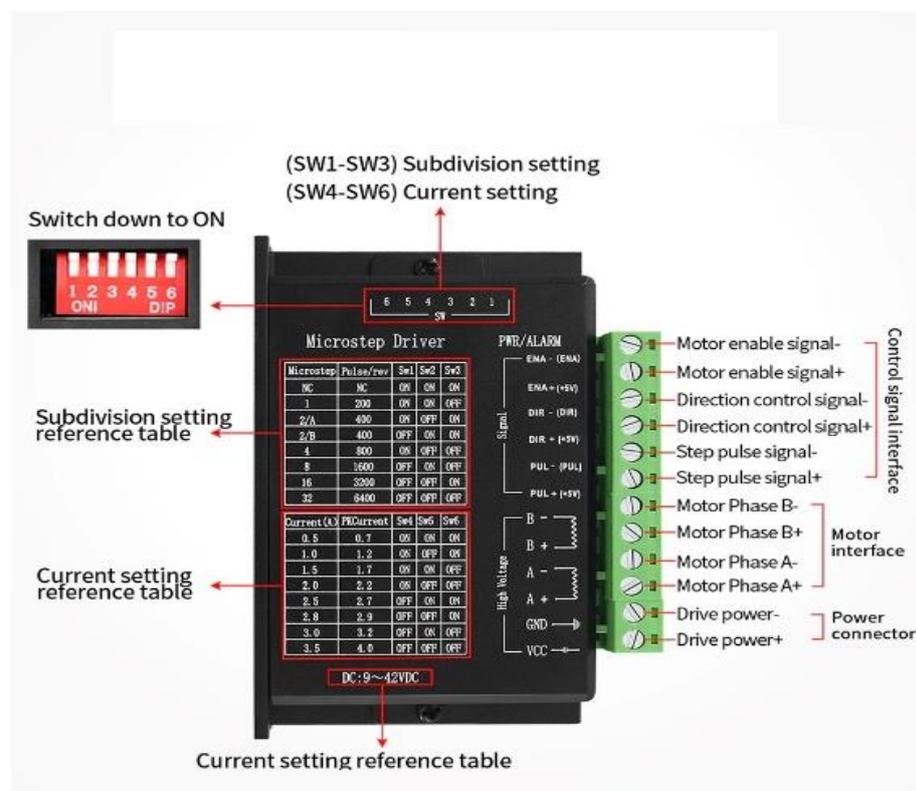
(Anonim, 2022).

2.5 Driver Motor Stepper TB6600

Driver motor *stepper* merupakan komponen yang berfungsi untuk mengkomunikasikan kontroler dengan aktuator serta memperkuat sinyal keluaran dari kontroler sehingga dapat dibaca oleh aktuator. *Driver* motor *stepper* digunakan

sebagai sebuah pengontrol untuk mengatur arah dan kecepatan putaran pada motor *stepper*. *Driver* motor *stepper* akan mengendalikan sumber tegangan yang masuk pada motor *stepper* yang berasal dari mikrokontroler (Choirony *et al.*, 2021).

Pada penelitian ini menggunakan motor *driver board* TB6600 untuk CNC 4 *axis*. *Driver* motor mempunyai beberapa port yang nantinya terhubung ke masing-masing port seperti *input* signal, motor *stepper*, *driver switch setting*, DC *power supply* (Harrizal *et al.*, 2017). Pada **Gambar 2.7** adalah gambar dari motor *driver* motor TB6600 beserta *pin layout driver*.



Gambar 2.7 Pin Layout Driver Motor TB6600 (Anonim, 2021).

Pada **Gambar 2.7** menunjukkan *pin layout driver* TB6600 yang dibagi menjadi tiga sinyal kontrol *interface*. Sinyal kontrol terdiri dari masukan sinyal pulsa positif (PUL+), masukan sinyal pulsa negatif (PUL-), masukan sinyal arah positif (DIR+), masukan sinyal arah negatif (DIR-), mengaktifkan *offline* masukan sinyal positif (EN+), mengaktifkan *offline* sinyal negatif (EN-). *Power connector* terdiri dari DC (+) dan D (-) yang dihubungkan dengan *power supply* dengan tegangan 12 –

48VDC). Motor *interface* terdiri dari motor *phase* B-, B+, A-, dan A+ yang dihubungkan dengan *two-phase hybrid* dari *stepper* motor (Anonim 2021). Pada **Tabel 2.1** berikut menjelaskan tentang spesifikasi dari *driver* motor TB6600.

Tabel 2.1 Spesifikasi *driver* motor TB6600 (Anonim, 2021).

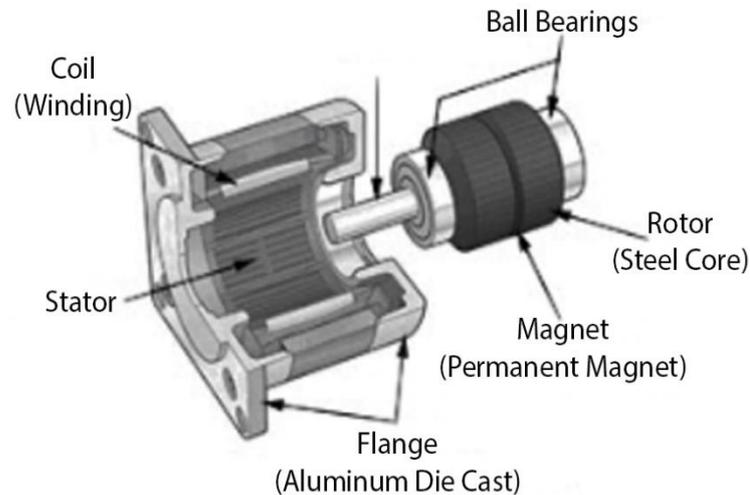
Model	TB6600
Kemampuan interferensi	Anti frekuensi tinggi
Arus masukan	0-5.0A
Arus keluaran	0.5-4.0A
Daya maksimum	160W
Micro step	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16
Suhu	-10 ~ 45OC
Kelembaban	Tidak kondensasi
Berat	0.2 kg
Dimensi	96x56x33 mm

2.6 Motor Stepper

Motor *stepper* merupakan salah satu jenis motor yang banyak digunakan sebagai aktuator, misalnya sebagai penggerak *head* baca atau tulis pada *disk drive* yang akan menetapkan posisi *head* baca atau tulis di atas permukaan piringan disket, penggerak *head* pada printer dan *linefeed* robotik. Dengan bantuan microprocessor atau mikrokontroler, perputaran motor dapat dikontrol dengan tepat dan terprogram. Motor *stepper* adalah suatu perangkat elektronik, sama seperti motor listrik pada umumnya, motor *stepper* bekerja mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa gerakan motor *discert* (terputus) yang disebut *step* (langkah) menggunakan prinsip elektromagnetik (Supriyadi *et al.*, 2020).

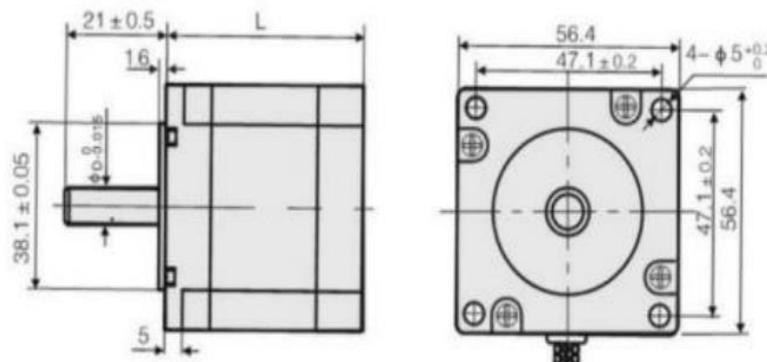
Perbedaan antara motor *stepper* dengan motor DC yaitu motor DC mempunyai magnet tetap pada stator, sedangkan motor *stepper* mempunyai magnet tetap pada rotor. Pemberian tegangan pada setiap fase secara berurutan, motor akan berputar dengan selangkah demi selangkah. Dengan langkah yang dapat diatur menggunakan komputer untuk mencapai posisi yang tepat dan mengontrol kecepatan yang menyebabkan motor *stepper* cocok digunakan untuk pekerjaan yang membutuhkan presisi yang tinggi (Fatoni, 2022). Selain itu motor *stepper* dipilih karena motor *stepper* dapat dikendalikan dengan cukup mudah dan memiliki ketelitian yang tinggi (Harrizal *et al.*, 2017). Motor *stepper* pada kecepatan yang

rendah akan menghasilkan torsi yang besar. Untuk menggerakkan motor *stepper* diperlukan pengendali motor *stepper* yang membangkitkan pulsa-pulsa periodik seperti *driver* motor. Pada **Gambar 2.8** adalah gambar konstruksi motor *stepper*.



Gambar 2.8 Konstruksi Motor *Stepper* (Anonim, 2021).

Pada penelitian ini menggunakan motor *stepper* jenis Nema-23. Motor *stepper* Nema-23 memiliki torsi 178,5 oz-inch (1,26 Nm) yang cocok digunakan untuk mengerjakan bahan seperti PCB, akrilik, kayu, dan aluminium. Pada **Gambar 2.9** adalah gambar motor *stepper* Nema-23.



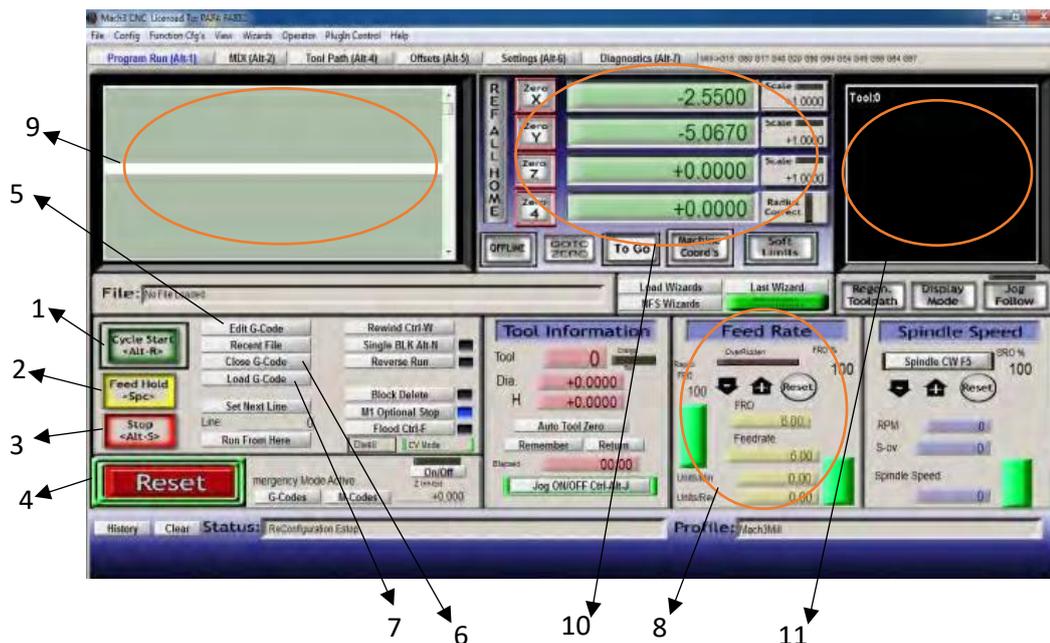
Gambar 2.9 Motor *Stepper* Nema-23 (Hasibuan, 2019).

2.7 Software Mach 3

Mach 3 digunakan untuk mengontrol dan menghubungkan komputer dengan mesin CNC. Mach 3 merupakan perangkat lunak yang berfungsi untuk mengubah perintah

komputer menjadi sebuah peranti kontroler untuk mesin CNC (Kurniawan dan Jekky, 2020). Perangkat lunak Mach 3 merupakan sebuah *control software* yang diciptakan oleh *ArtSoft* USA. Penggunaan Mach 3 melibatkan komputer untuk memasukkan perintah-perintah diantaranya mengatur pergerakan *linier* pada setiap *axis* dengan cara mengatur putaran dan arah putaran motor pada setiap *axis* pada mesin CNC (Pramono *et al.*, 2012). Mach 3 digunakan sebagai pengontrol CNC perangkat lunak sumber terbuka yang mengontrol mesin CNC tanpa bergantung merek dan model mesin CNC dengan mengubah kode G menjadi sinyal digital untuk operasi mesin CNC (Elmiawan *et al.*, 2022). Tersedia dalam bentuk versi gratis dan versi berbayar. Kedua versi relatif sama, tetapi pada versi gratis *G-Code* yang bisa dimasukkan hanya 500 baris. Sementara untuk versi berbayar kita dapat memasukkan *G-Code* dalam jumlah melebihi 10.000.000 baris (Fernety dan Prantice, 2005).

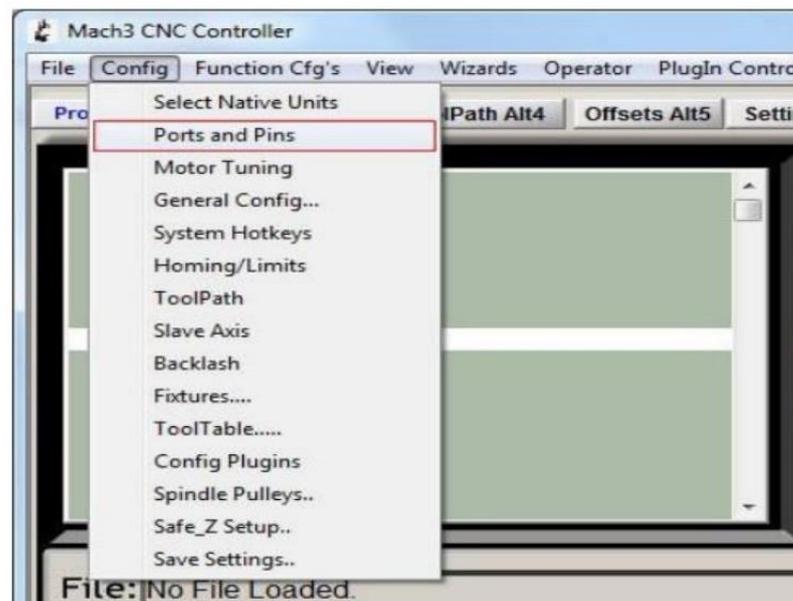
Mach 3 memiliki kelebihan dalam hal fitur untuk pengendali mesin CNC. Mach 3 dapat bekerja pada kebanyakan komputer berbasis sistem operasi Microsoft Windows untuk mengontrol gerakan motor *stepper* dengan mengolah kode perintah *G-Code*. Mach 3 dapat disesuaikan dan dikonfigurasi secara fleksibel. Mach 3 telah banyak digunakan pada aplikasi dengan berbagai jenis perangkat keras. Perangkat lunak ini dapat bekerja pada komputer dengan jalur koneksi *parallel port* maupun *USB port*. Pada **Gambar 2.10** Merupakan tampilan menu program *run* dari aplikasi perangkat lunak Mach 3.



Gambar 2.10 Menu Tampilan Program *Run* Mach 3 (Firsa, 2017).

Pada **Gambar 2.10** Menunjukkan tampilan menu program *run* Mach 3. Fitur-fitur pada tampilan program run pada *software* Mach 3 sebagai berikut.

1. *Cycle start*, merupakan perintah yang digunakan untuk menjalankan *G-Code*
2. *Feed hold*, merupakan perintah yang digunakan untuk menghentikan *G-Code* sementara
3. *Stop*, Sebagai perintah yang digunakan untuk menghentikan total *G-Code*
4. *Reset*, Sebagai perintah yang digunakan untuk menghentikan atau memulai hubungan *software* dan *hardware*
5. *Edit G code*, Sebagai perintah yang digunakan untuk mengedit *G-Code*
6. *Clear G code*, Sebagai Perintah yang digunakan untuk menghapus *G-Code*
7. *Load G code*, Sebagai perintah yang digunakan untuk mengambil *G-Code* dari komputer
8. *Feed rate*, Digunakan untuk memantau kecepatan pemakan serta untuk menambah dan mengurangi kecepatan potong
9. Layar Untuk menampilkan *G-Code*
10. Untuk menunjukkan koordinat mesin dari sumbu X, Y, dan Z
11. Untuk menampilkan gambar *G-Code* serta sebagai layar untuk memantau pergerakan mesin.



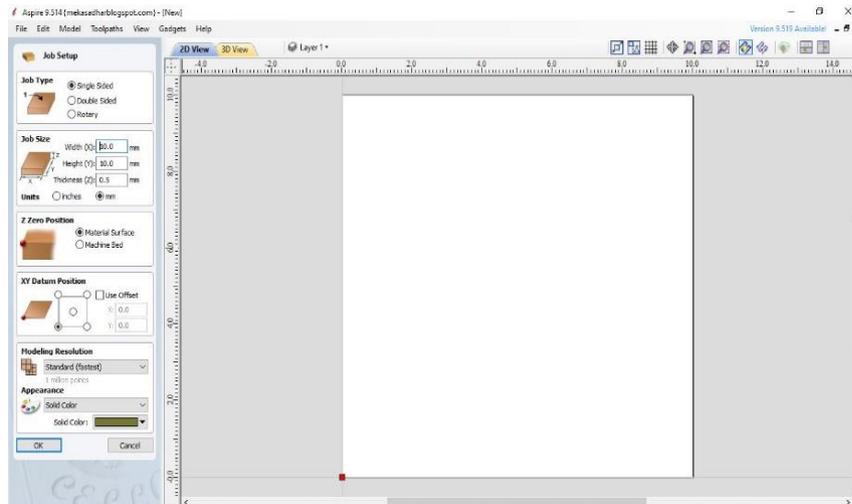
Gambar 2.11 Tampilan *Toolbar Config* Mach 3 (Firsa, 2017).

Pada **Gambar 2.11** merupakan tampilan toolbar config Mach 3 dengan fungsi dan kegunaan masing-masing. Menu toolbar memiliki fungsi sebagai berikut.

1. *Ports and pins* Digunakan untuk mengatur pin *input* dan pin *output*
2. *Motor turning* Digunakan untuk mengatur kecepatan motor *stepper*
3. *Homing/Limits* Digunakan untuk mengatur batas maksimal kerja mesin

2.8 *Software Aspire*

Aspire merupakan salah satu produk *Computer Aided Manufacturing* (CAM) teratas dari perusahaan perangkat lunak di Inggris. *Software Aspire* yang kuat dalam desain model dua dimensi dan tiga dimensi digunakan untuk mesin CNC. *Software Aspire* dapat digunakan dengan mudah dan guntingan yang sederhana untuk ukiran hias yang kompleks pada mesin CNC. Antarmuka perangkat lunak yang intuitif dan mudah digunakan. *Software Aspire* dapat menggunakan gambar dua dimensi, foto, lukisan, dan karya seni digital menjadi model tiga dimensi dan memotong dengan mesin CNC (Anonim, 2016). Pada **Gambar 2.12** adalah tampilan awal menu *software aspire*.



Gambar 2.12 Tampilan Menu *Software Aspire* (Anonim, 2020).

Pada **Gambar 2.12** merupakan tampilan menu *software Aspire* dengan fitur utama dari aplikasi *Aspire* sebagai berikut.

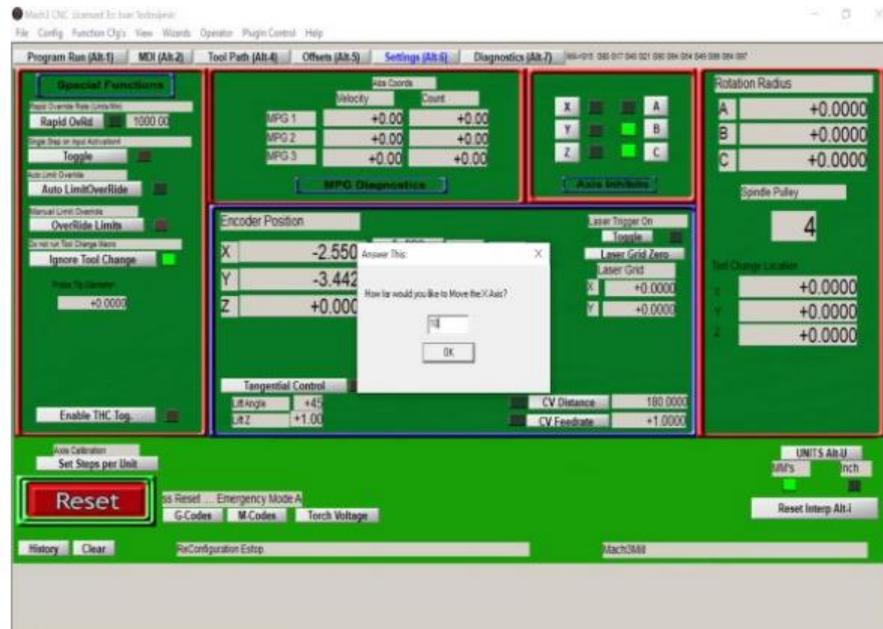
1. Desain Komponen 3D dari vektor 2D
2. 3D Tekstur dari file gambar
3. Impor file 3D
4. 3D Interaktif editing - mematum, pencampuran, menghaluskan dan 3D *Roughing* dan *Toolpaths Finishing*
5. Semua 2D, desain dan tata letak alat yang tersedia di *VCarve Pro* - kontrol lapisan, panduan garis, Snap Grid
6. Interaktif vektor ukuran, posisi, editing simpul
7. Terbungkus sumbu mesin *Rotary*
8. *VCarving* dan 3D *Engraving Toolpaths*

2.9 Uji Kalibrasi

Ralat Kalibrasi berkaitan erat dengan alat yang tidak benar saat dilakukan pengukuran. Uji kalibrasi untuk menjalankan mesin CNC adalah sistem kalibrasi interface dengan pergerakan mesin. Tujuan kalibrasi yaitu untuk memastikan perintah dari komputer mampu dibaca dengan tepat oleh pergerakan mesin. Sistem kalibrasi juga untuk memastikan mesin mampu melakukan proses permesinan secara teliti dan presisi, sehingga dengan adanya sistem kontrol numerik akan

memberikan kelebihan yang signifikan apabila dibandingkan dengan mesin konvensional yang dijalankan oleh operator mesin (Harrizal *et al.*, 2017).

Proses kalibrasi gerakan pada masing-masing fungsi kode pemrograman (*G-Code*) pada setiap sumbu sangat diperlukan untuk meningkatkan ketelitian dan ketepatan mesin CNC terhadap dimensi dari hasil pemotongan benda kerja (Amala, 2013).



Gambar 2.13 Kalibrasi Motor *Stepper* (Elmiawan *et al.*, 2022).

Gambar 2.13 merupakan tampilan menu kalibrasi motor *stepper* pada aplikasi *software* Mach 3. Kalibrasi pada motor *stepper* dilakukan untuk mengetahui tingkat kepresisian. Dalam melakukan kalibrasi gerakan dari motor *stepper* dengan memasukkan nilai dan ukur aktual nilai yang dihasilkan oleh mesin CNC *Router*, kemudian menyesuaikan nilai pada sistem dengan nilai hasil pengukuran aktual gerakan yang dihasilkan oleh motor *stepper* dengan memasukkan nilai hasil pengukuran aktual kepada sistem Mach 3.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Maret sampai November 2023. Kegiatan penelitian ini terdiri dari pemilihan komponen yang akan digunakan, perancangan mesin CNC, perancangan sistem kontrol mesin, pembuatan program untuk menjalankan mesin, pengujian sistem kontrol, pengambilan data dan analisis hasil. Tahap perancangan, pembuatan, dan pengujian dilaksanakan di Ruang Workshop Laboratorium Fisika Dasar, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung, yang bertempat di Gedong Meneng Rajabasa, Bandar Lampung, Provinsi Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini diperlukan peralatan dan beberapa bahan untuk membuat rancang bangun mesin CNC *Router 4 axis*. Peralatan dan bahan yang digunakan merupakan sebagai penunjang utama untuk membuat kerangka dan sistem pada mesin CNC ini. Adapun peralatan yang digunakan dalam melakukan penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3. 1 Alat – alat yang digunakan

No	Nama	Fungsi
1	Laptop	Membuat desain model dua dimensi dan mengubah menjadi bahasa <i>G-Code</i> menggunakan <i>software</i> <i>Aspire</i> dan mengubah perintah komputer menjadi sebuah peranti kontroler untuk mesin CNC menggunakan <i>software</i> <i>Mach 3</i>
2	Kabel USB	Mentransmisikan dan atau mengupload program
3	Jangka sorong	Sebagai pengukur kedalaman objek dan menghitung selisih ukuran objek
4	Mesin las	Untuk menyambungkan komponen rangka
5	Peralatan Lainnya	Komponen pendukung dalam pembuatan mesin, seperti obeng, bor, solder, tang potong, gergaji, penggaris siku, meteran, gunting, dan lain-lain

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.2.**

Tabel 3. 2 Bahan – bahan yang digunakan

No	Nama	Fungsi
1	<i>Board</i> USB Mach 3	Sebagai kontroler penghubung sinyal dari data komputer menuju <i>driver</i> motor untuk motor <i>stepper</i>
2	<i>Driver</i> motor TB6600	Sebagai sebuah pengontrol untuk mengatur arah dan kecepatan putaran pada motor <i>stepper</i>
3	Motor <i>stepper</i> Nema-23	Untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa gerakan motor <i>discert</i> (terputus)
4	<i>Power Supply</i>	Sebagai sumber tegangan rangkaian elektronik
5	<i>Limit Switch</i>	Untuk memutuskan atau menghubungkan aliran listrik dari motor listrik secara otomatis.
6	Saklar	Sebagai tombol <i>ON OFF</i> untuk menghidupkan atau mematikan mesin CNC
7	Kabel	Untuk menghubungkan rangkaian
8	Kipas	Menjaga suhu komponen elektronik agar tetap optimal
9	Alumunium Profile	Untuk membuat rangka mesin CNC dan kotak komponen elektronik
10	Besi Holo	Untuk membuat rangka mesin CNC
11	Mata pisau CNC	Untuk memotong atau mengukir objek
12	Baut	Sebagai alat sambung rangka mesin

No	Nama	Fungsi
13	<i>Ball Screw</i>	Sebagai pemindah gerak dari putaran motor <i>axis</i> menjadi gerakan translasi linier bolak-balik meja atau kepala mesin

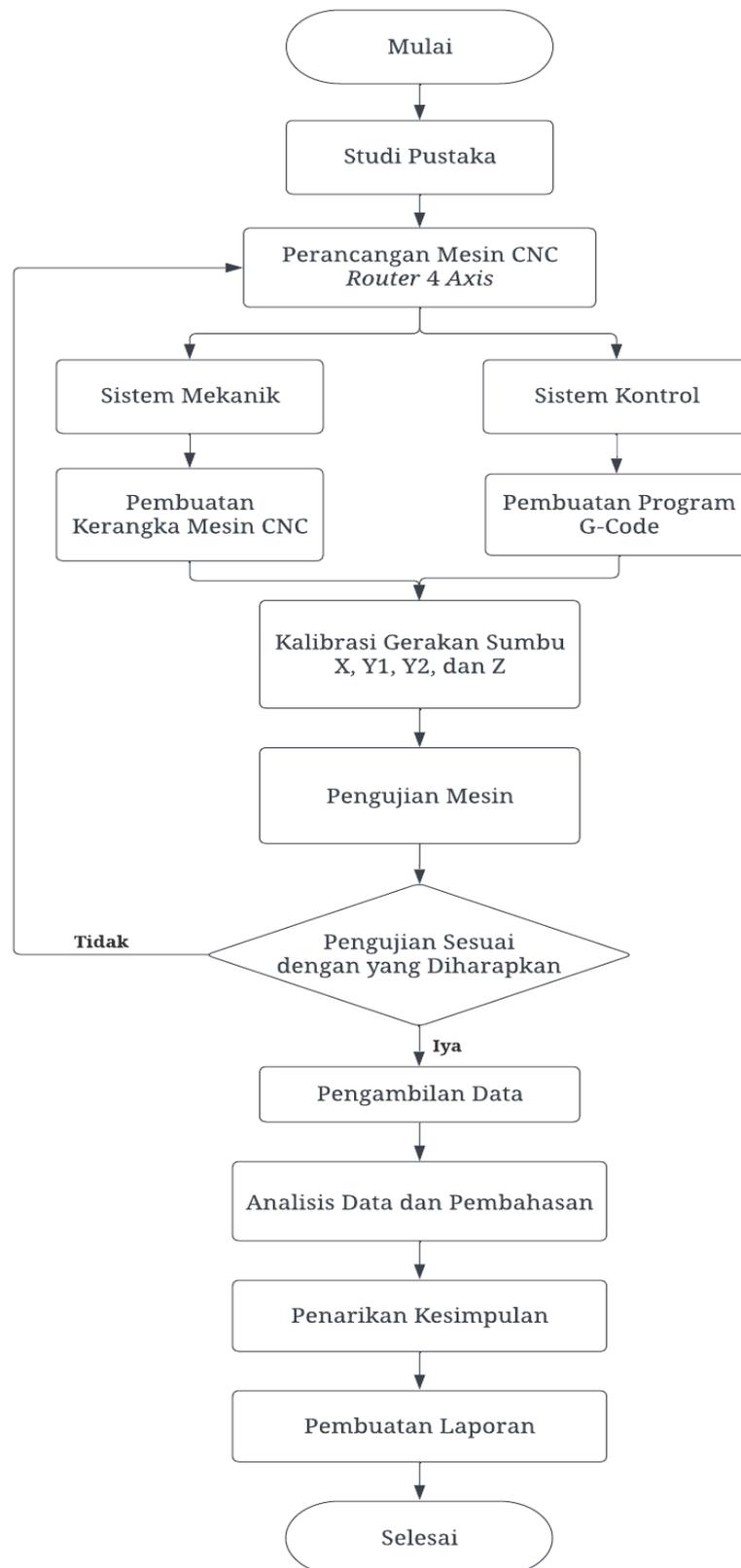
Komponen lainnya yang digunakan yaitu perangkat lunak (*software*). Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Perangkat lunak yang digunakan

No	Nama	Fungsi
1	Mach 3	Mengubah perintah komputer menjadi sebuah peranti kontroler untuk mesin CNC
2	Aspire	Membuat desain model dua dimensi maupun tiga dimensi dan mengubah menjadi bahasa pemrograman <i>G-Code</i>
3	Fritzing	Membuat sistem perancangan dan perangkaian
4	Sketch Up	Membuat desain kotak komponen elektronik dan mesin
5	Microsoft Office Word 2021	Membuat laporan penelitian
6	Microsoft Office Excel 2021	Menulis dan mengolah hasil data

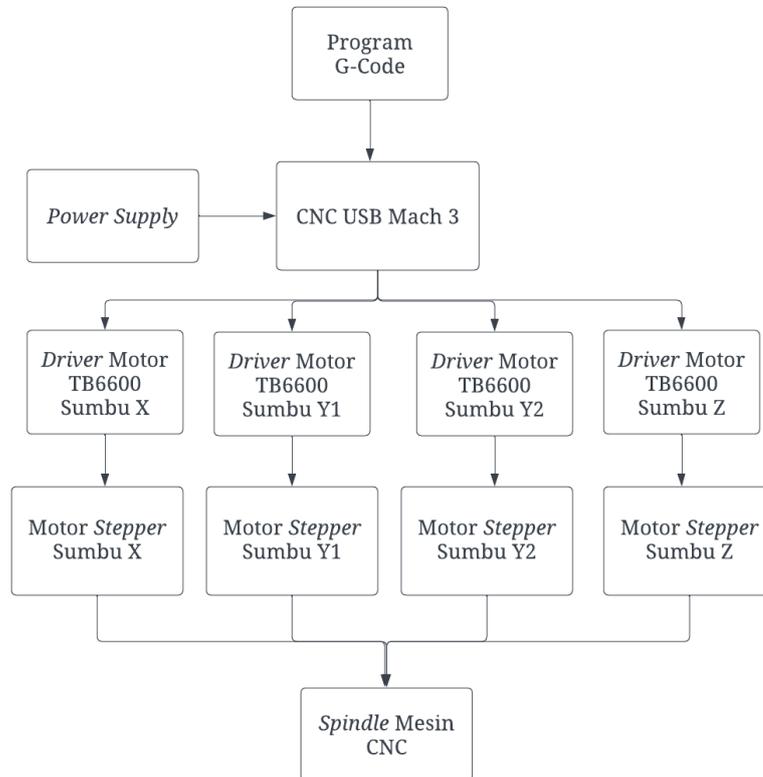
3.3 Prosedur Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini mencakup beberapa langkah, dimulai dengan pemilihan komponen yang akan digunakan, perancan mesin, perancangan sistem kontrol mesin CNC, pembuatan program untuk menjalankan mesin, kalibrasi Mach 3, pengujian mesin, pengambilan data dan analisis hasil. Langkah-langkah rancang bangun sistem kontrol mesin CNC 4 *axis* disajikan dalam bentuk *flowchart* yang dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Flowchart perancangan mesin CNC.

Berikut ini adalah diagram blok rancangan sistem kontrol yang akan digunakan pada mesin CNC Router 4 axis yang diperlihatkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Diagram Blok Perancangan Sistem.

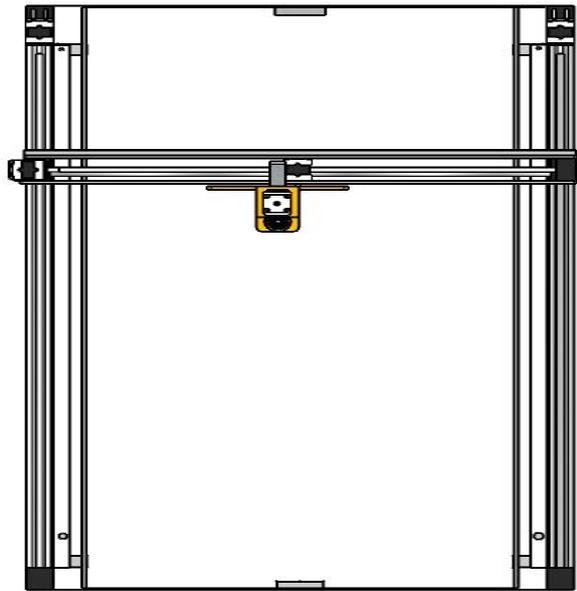
Sistem kontrol mesin CNC Router 4 axis ini menggunakan USB Mach 3 sebagai kontroler untuk mengontrol seluruh sistem dari mulai *input*, *output* hingga pengiriman data ke motor *stepper* dan motor *spindle*. *Power supply* digunakan sebagai sumber daya yang dipakai pada rangkaian. Masukan dari *software* aspire yang berupa *G-Code* agar terbaca oleh modul CNC. Kemudian data yang masuk akan dikirimkan ke mikrokontroler Mach 3 menggunakan USB serial. USB Mach 3 terhubung dengan motor *driver* TB6600. *Driver* ini berfungsi menerima dan membaca data sebelumnya kemudian menghasilkan *output* untuk mengontrol keempat motor *stepper*. Keempat motor *stepper* masing-masing bekerja terhadap sumbu X, Y1, Y2 dan Z yang kemudian mengirimkan perintah kepada motor DC untuk menggerakkan mata bor. *Board* USB Mach 3 juga terhubung dengan limit swith yang berfungsi untuk memberi batasan pada motor *stepper* agar tidak bekerja

melewati bidang kerja yang telah ditentukan. Berikut ini adalah tahapan dalam pembuatan mesin CNC *Router 4 axis*.

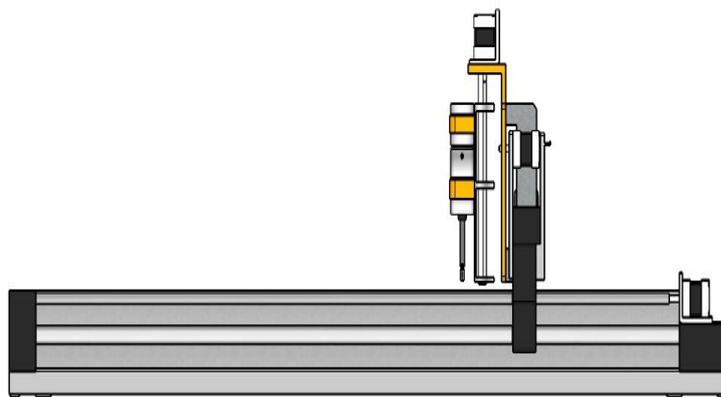
1. Tahap perancangan sistem kontrol mesin CNC *Router 4 axis* diawali dengan membuat skematik rangkaian dan desain *hardware* dari mesin CNC *4 axis*. *Driver* motor yang digunakan yaitu TB6600, motor *stepper* tipe Nema-23 dan *Board* USB Mach 3.
2. Tahap pemrograman bertujuan untuk menjalankan sumbu gerak mesin CNC dengan menggunakan *software* Aspire untuk mendesain dan *software* Mach 3 untuk mengubah gambar menjadi *G-Code* dengan kontroler *Board* USB Mach 3.
3. Tahap pengujian akurasi dan kalibrasi bertujuan untuk mengetahui kemampuan, akurasi dan presisi mesin CNC *Router 4 axis* dengan menguji semua sumbu yang digunakan (sumbu X, Y₁, Y₂, dan Z). Kalibrasi terhadap pergerakan mesin dilakukan agar ukuran pergerakan mesin sesuai dengan perintah pada komputer. Pengujian dilakukan dengan cara menggerakkan sumbu menggunakan *software* dengan jarak yang telah ditetapkan kemudian mengukur jarak pergerakan pada mesin.

3.3.1 Desain dan Perancangan Mesin

Pada penelitian ini didesain dan dirancang sebuah mesin CNC *Router 4 axis* menggunakan bahan besi holo dan sistem kontrol menggunakan modul *board* USB Mach 3 sebagai kontroler, *driver* motor TB6600, motor *stepper* Nema-23, dan perangkat lunak Mach 3. Berikut ini adalah desain dari mesin CNC *Router 4 axis* yang disajikan pada **Gambar 3.3**.



(a)

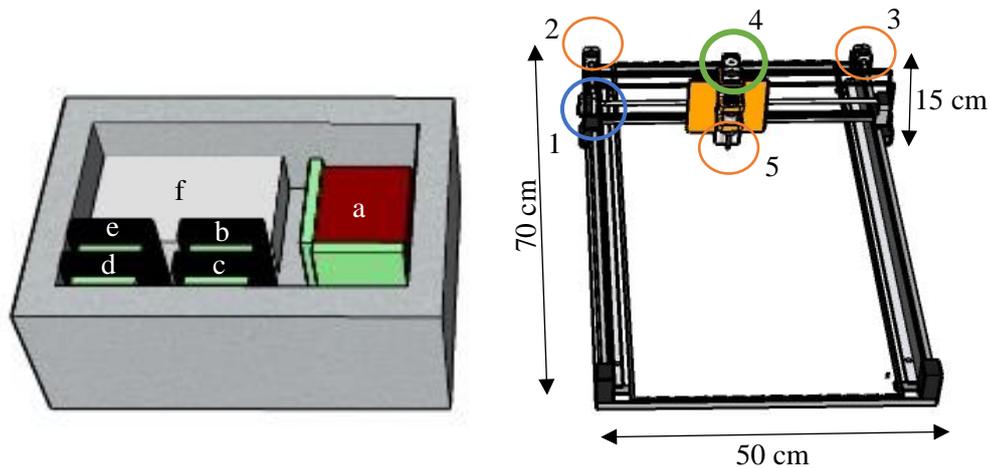


(b)

Gambar 3.3 Desain mesin CNC Router 4 axis (a)tampak atas, (b)tampak samping.

Pada **Gambar 3.3** merupakan desain mesin CNC Router 4 axis menggunakan bahan besi holo dengan ukuran mesin 50 cm x 70 cm x 15 cm. Driver motor stepper TB6600, power supply, dan mikrokontroler Board USB Mach 3 diletakkan pada kotak komponen elektronik. Driver motor stepper TB6600 dihubungkan dengan motor stepper Nema-23 yang telah dipasang di kerangka mesin CNC Router.

Driver motor TB6600 dan motor *stepper* yang digunakan sebanyak empat buah. Berikut ini merupakan penjelasan dari desain mesin CNC Router 4 axis dan kotak komponen yang digunakan untuk tempat elektronik kontroler mesin CNC yang dijelaskan pada **Gambar 3.4**.



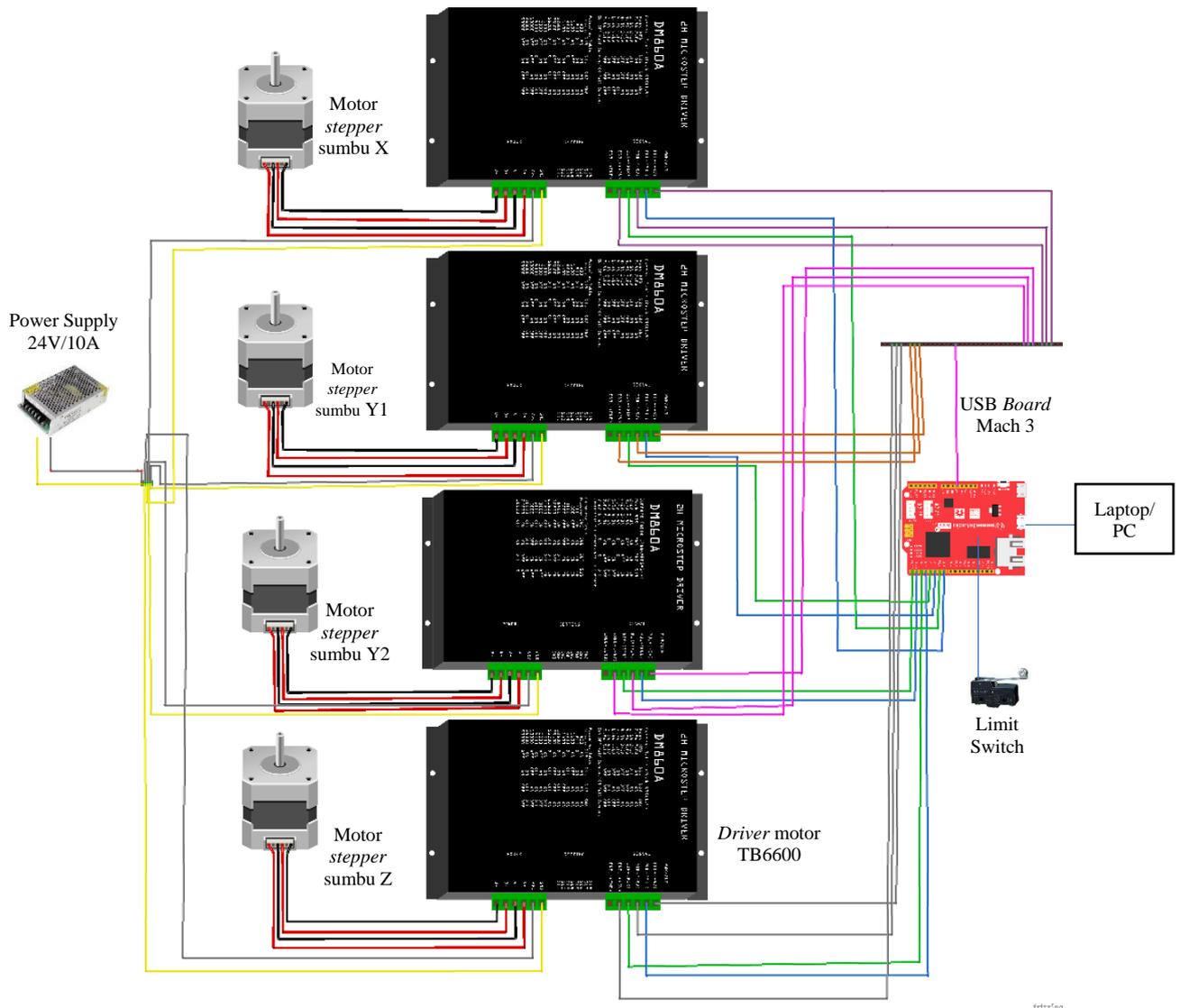
Gambar 3.4 Desain mesin CNC Router 4 axis beserta Kotak Komponen Elektronik.

Keterangan mengenai desain mesin CNC Router 4 axis beserta kotak komponen elektronik pada **Gambar 3.4** adalah sebagai berikut:

1. Motor *stepper* sebagai sumbu X.
2. Motor *stepper* sebagai sumbu Y1.
3. Motor *stepper* sebagai sumbu Y2.
4. Motor *stepper* sebagai sumbu Z.
5. Mata pisau.
6. Kotak komponen elektronik yang didalamnya terdiri:
 - a. *Board* mikrokontroler CNC Mach 3 USB;
 - b. *driver* motor TB6600 sumbu X;
 - c. *driver* motor TB6600 sumbu Y1;
 - d. *driver* motor TB6600 sumbu Y2;
 - e. *driver* motor TB6600 sumbu Z;
 - f. *power supply*; dan
 - g. kipas.

3.3.2 Skematik Rangkaian Sistem Kontrol *Board Mach 3*

Pada penelitian ini digunakan USB Mach 3 *motion card* sebagai *board* mikrokontroler. *Driver* motor TB6600 digunakan untuk mengontrol arah dan kecepatan *stepper* motor. *Stepper* motor tipe Nema-23 akan digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa gerakan motor DC. Rangkaian sistem kontrol *Board Mach 3* mesin CNC Router 4 axis yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Rangkaian Sistem Kontrol Mesin CNC.

Ditampilkan pada **Gambar 3.5** merupakan bentuk rangkaian skematik dari sistem kontrol mesin CNC yang akan dibuat. Pin pada setiap *driver* motor dan motor

stepper akan dihubungkan ke Mach 3 USB *motion card* sebagai *board* mikrokontroler.

1. Pada *driver* motor sumbu X, pin DIR (-) dihubungkan dengan pin XD pada USB Mach 3. Pin PUL (-) dihubungkan dengan pin XP pada USB Mach 3. Dibutuhkan tegangan sebesar 24V untuk dapat mengoperasikan *driver* motor sumbu X.
2. Pada *driver* motor sumbu Y, pin DIR (-) dihubungkan dengan pin YD pada USB Mach 3. Pin PUL (-) dihubungkan dengan pin YP pada USB Mach 3. Dibutuhkan tegangan sebesar 24V untuk dapat mengoperasikan *driver* motor sumbu Y.
3. Pada *driver* motor sumbu Z, pin DIR (-) dihubungkan dengan pin ZD pada USB Mach 3. Pin PUL (-) dihubungkan dengan pin ZP pada USB Mach 3. Dibutuhkan tegangan sebesar 24V untuk dapat mengoperasikan *driver* motor sumbu Z.
4. Pada *driver* motor sumbu A, pin DIR (-) dihubungkan dengan pin AD pada USB Mach 3. Pin PUL (-) dihubungkan dengan pin AP pada USB Mach 3. Dibutuhkan tegangan sebesar 24V untuk dapat mengoperasikan *driver* motor sumbu A.
5. Pin power *interface* motor *driver* A+, A-, B+, B- dihubungkan pada pin 2-phase hybrid *stepper* motor Nema-23 yang berfungsi sebagai penentu arah putaran motor *stepper*.
6. Pin *input* 3 USB *motion card* Mach 3 dihubungkan pada pin *limit switch* yang disusun secara paralel tiap masing-masing sumbu.
7. Pin *input* 4 USB *motion card* Mach 3 dihubungkan pada pin *emergency stop*.
8. Pin out 4 USB *motion card* Mach 3 dihubungkan pada pin *relay*.
9. Port USB pada USB *motion card* Mach 3 digunakan untuk dihubungkan pada laptop/PC.

3.3.3 Pengujian Mesin CNC Router 4 axis

Pengujian mesin CNC Router 4 axis dilakukan dengan pengambilan data pada mesin CNC untuk mengukur pada masing-masing sumbu yang kemudian akan dibandingkan nilai *input* dan nilai hasil pengukuran. Kalibrasi bertujuan untuk memperoleh nilai akurasi, presisi, dan nilai *error*. Berikut ini tabel data pengamatan pada sumbu X (**Tabel 3.4**), Sumbu Y (**Tabel 3.5**), dan Sumbu Z (**Tabel 3.6**).

Tabel 3.4 Data pengujian pergerakan sumbu X pada mesin CNC Router 4 axis.

No	Nilai <i>Input</i> pengukuran (mm)	Nilai Hasil Pengukuran (mm)	Nilai Penyimpangan Pengukuran (mm)	Akurasi (%)	Presisi (%)	<i>Error</i> (%)
1	10					
2	0					
3	30					
4	40					
5	dst					
20	200					

Tabel 3.5 Data pengujian pergerakan sumbu Y₁ dan Y₂ pada mesin CNC Router 4 axis.

No	Nilai <i>Input</i> pengukuran (mm)	Nilai Hasil Pengukuran (mm)	Nilai Penyimpangan Pengukuran (mm)	Akurasi (%)	Presisi (%)	<i>Error</i> (%)
1	10					
2	20					
3	30					
4	40					
5	Dst					
20	200					

Tabel 3.6 Data pengujian pergerakan sumbu Z (kedalaman) pada mesin CNC
Router 4 axis

No	Nilai <i>Input</i> pengukuran (mm)	Nilai Hasil Pengukuran (mm)	Nilai Penyimpangan Pengukuran (mm)	Akurasi (%)	Presisi (%)	<i>Error</i> (%)
1	0,3					
2	0,6					
3	0,9					
4	1,2					
5	Dst					
20	200					

Nilai akurasi, presisi dan *error* dapat diperoleh dengan menggunakan **Persamaan (3.1) – (3.3)**

$$A = \left(1 - \left|\frac{Y - X_n}{Y}\right|\right) \times 100\% \dots \dots \dots (3.1)$$

$$P = \left(1 - \left|\frac{X_n - \bar{X}_n}{\bar{X}_n}\right|\right) \times 100\% \dots \dots \dots (3.2)$$

$$E = \left(\left|\frac{Y - X_n}{Y}\right|\right) \times 100\% \dots \dots \dots (3.3)$$

Dengan:

A : Nilai Akurasi (%)

P : Nilai Presisi (%)

E : Nilai *Error* (%)

Y : Nilai *Input* Pengukuran (mm)

X_n : Nilai Hasil pemotongan (mm)

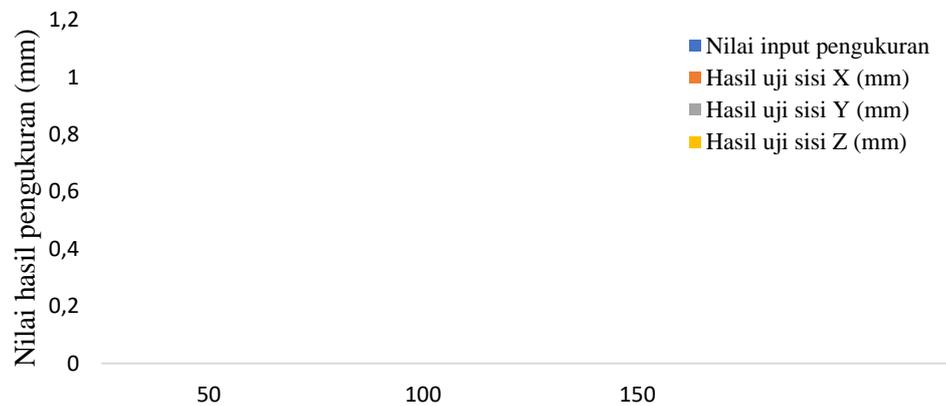
\bar{X}_n : Nilai Rata-rata Keseluruhan Nilai Hasil Pemotongan.

Setelah pengujian dan kalibrasi berhasil dilakukan, kemudian dilanjutkan dengan pengambilan data uji coba mesin pada bentuk persegi panjang dengan ukuran panjang 50 mm, lebar 30 mm, dan tinggi/kedalaman 5 mm. Tahap uji coba ini merupakan bentuk dari realisasi mesin CNC *Router 4 axis*. Data pengamatan akan disajikan dalam **Tabel 3.7**.

Tabel 3.7 Hasil bentuk persegi panjang

No	Feedrate (mm/menit)	Nilai Input			Nilai Hasil			Akurasi (%)			Waktu Proses (menit)
		Pengukuran			Pengukuran			X	Y	Z	
		X	Y	Z	X	Y	Z				
1	50	50	70	3							
2	100	50	70	3							
3	150	50	70	3							

Data pengamatan hasil uji coba mesin yang telah diperoleh kemudian dianalisis. Data pengamatan yang telah diperoleh akan disajikan dalam bentuk grafik kurva seperti pada **Gambar 3.6**.

**Gambar 3.6** Grafik Hasil Pengujian Mesin CNC Router 4 axis.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan data hasil kalibrasi dan pemotongan dengan mesin CNC Router 4 axis menggunakan USB Board Mach 3 dan motor stepper nema-23 yang dilakukan pada penelitian ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Rancang bangun mesin *Computer Numerical Control (CNC) Router 4 axis* menggunakan modul board USB Mach 3, driver motor TB6600 dan motor stepper Nema-23 dengan aplikasi Mach 3 telah berhasil melakukan pemotongan dan dapat dijalankan sesuai dengan perintah program.
2. Mesin *Computer Numerical Control (CNC) Router 4 axis* mampu menggerakkan sumbu X dengan tingkat rata-rata akurasi sebesar 99,59%, dengan tingkat rata-rata presisi sebesar 99,49% dan rata-rata error sebesar 0,41%.
3. Mesin *Computer Numerical Control (CNC) Router 4 axis* mampu menggerakkan sumbu Y_1 dan Y_2 dengan tingkat rata-rata akurasi sebesar 99,21%, dengan tingkat rata-rata presisi sebesar 99,29% dan rata-rata error sebesar 0,79%.
4. Mesin *Computer Numerical Control (CNC) Router 4 axis* mampu menggerakkan sumbu Z dengan tingkat rata-rata akurasi sebesar 97,17%, dengan tingkat rata-rata presisi sebesar 99,82% dan rata-rata error sebesar 2,83%.

5.2 Saran

Saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya adalah mesin *Computer Numerical Control (CNC) Router 4 axis* dapat dikembangkan dengan menambahkan penghisap debu pembersih sisa pekerjaan agar mesin tetap bersih setelah pengerjaan dan juga dapat menambahkan jumlah *axis*/sumbu sehingga dapat digunakan untuk bidang kerja selain berbentuk datar.

DAFTAR PUSTAKA

- Amala, M., & Widyanto, S. A. 2014. Pengembangan Perangkat Lunak Sistem Operasi Mesin Milling CNC Trainer. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 2(3), 204-210.
- Anonim. 2021A. *Data Sheet Stepper Motor Driver TB6600*. Diambil dari <https://components101.com/modules/tb6600-stepper-motor-driver-module-pinout-features-datasheet-working-application-alternative>. [Diakses 13 Februari 2023].
- Anonim.2021B.*MengenalMotorStepper*.<https://www.andalanelektro.id/2021/01/mengenal-motorstepper.html>. [Diakses 13 Februari 2023].
- Anonim. 2011. *Sensor Optocoupler*. [Http://www.soselelectronic.com](http://www.soselelectronic.com). [Diakses 13 Februari 2023].
- Anonim.2016.Aspire.<https://fjb.kaskus.co.id/product/5821bc6031e2e6544a8b456c/vectric-aspire-v8-software-desain-model-untuk-cnc>. [Diakses 13 Februari 2023].
- Anonim.2022.*Mach3USBInterfaceBoard*.<https://buildyourcnc.com/item/electronicsAndMotors-electronic-component-breakout-Mach-3-USB-Board>. [Diakses 13 Februari 2023].
- Anrinal, Putra, M. I., & Viola, R. O. 2022. View of Manufacturing System Design of a CNC Laser Engraver. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(1), 32–38.
- Arkundato, A. 2018. Pengukuran dan Ketidakpastian. *Modul Fisika*, 3(1), 1-35
- Bisono, F. 2017. Proses kalibrasi sumbu X, Y, dan Z pada mesin CNC Router Kayu 3 Axis menggunakan alat bantu dial indicator dan block gauge. *In Proceedings Conference on Design Manufacture Engineering and its Application*, 1(1), 350-356
- Budhi, A., Taufik Qurahman, M., & Rasyid, A. 2021. Desain Mesin CNC Router 3 Axis Berbantu Perangkat Lunak Autodesk Inventor. *Journal Mechanical Engineering*, 10(1), 1-5.

- Choirony, I. V., Hariyanto, M. S., Ulum, M., Ubaidillah, A., Haryanto, & Alfita, R. 2021. Rancang Bangun Acrylic Engraver and Cutting Machine Menggunakan CNC Milling 3 Axis Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal ElektriKa*, 13(1), 13-21.
- Draganescu, F., Gheorghe, M., Doicin, C.V. 2003. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. *Journal of Materials Processing Technology*. 141(1). 30-35
- Elmiawan, P., Dharmanto., Adik., Fazalul, M., & Arief, R. 2022. Akurasi Mesin CNC Router Low Budget Berbasis Mach 3. *Jurnal ROTOR*, 15(2), 70-75.
- Elvys, E. Y., & Sirama. 2015. Peningkatan Keakurasian Gerakan Pada Prototype Mesin CNC Milling 3-Axis. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin, XIV*.
- Febryanto, I. D., & Kartikasari, S. D. 2022. Perancangan Mesin CNC Router 3 Axis Berbasis Metode Quality Function Deployment (QFD). *Journal of Industrial Engineering and Management*, 17(1), 13-21.
- Firsa, T., Tadjuddin, M., Husaini, S., & Syahriza. 2015. Perancangan dan Pembuatan Prototype Mesin CNC 4 Axis Berbasis PC (Personal Computer). *Jurnal Teknik Mesin Unsyiah*, 3(2), 75–79.
- Ghozali, I. 2009. *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program SPSS*. Semarang: Universitas Diponegoro
- Harrizal, I.S., Syafri, S., & Prayitno, A. 2017. Rancang Bangun Sistem Kontrol Mesin CNC Milling 3 axis menggunakan Close Loop Sistem. *JOM FTEKNIK*, 4(2), 1-8.
- Hasibuan, M. R. A., Muhaimin., Hardi. S. 2019. Rancang Bangun Mesin CNC Milling 3 Axis Untuk Anggrave PCB Berbasis Arduino Uno. *Jurnal TEKRO*, 3(1), 40-47.
- Jufrizaldi, M., Ilyas., Marzuki. 2020. Rancang Bangun Mesin CNC Milling Menggunakan System Kontrol GRBL Untuk Pembuatan Layout PCB. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 4(1), 37-44.
- Kuncara, M., & Lili, R. 2022. Analisis Pengaruh Variasi *Feedrate* Terhadap Akurasi Mesin CNC Router 3 axis Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal Ilmu Teknik*. 3(1), 19-24.
- Kurniawan, E., & Jekky, B. 2020. Rancang Bangun Mesin CNC Lathe Mini 2 Axis. *Jurnal Engine*, 4(2), 83–90.
- Ma'arif, K., Yusril, M., Muhtar, Sunding, A., & Wibowo, N. R. 2021. Rancang Bangun Mesin CNC Router. *Jurnal Tematis*, 2(1), 1–10.

- Malik, I., Azharudin., Slamet, R. 2019. Pengaruh *Spindle speed*, *Feedrate*, dan *depth of cut* terhadap akurasi hasil permesinan pada mesin CNC Router 3 sumbu. *Jurnal Austenit*. 11(2), 33-40.
- Marcelina, T., Kusuma Wijaya, D., Tjahyono, R., & Suprijono, H. 2021. Optimasi Proses Cutting Material Akrilik pada CNC Laser G-Weike LC6090 dengan Metode Simplex Centroid Design dan Optimasi Plot Multirespon. *Jurnal Ilmiah GIGA*, 24(1), 23–34.
- Miftah. 2013. Implementasi Metode Kuzzy Logic Sugeno Pada Pengaturan Suhu Ruang Penyimpanan Berbasis Mikrokontroler. *Perpustakaan Universitas Pendidikan Indonesia*, 2(1), 1-10.
- Morris, A.S., & Langari, R. 2016. *Measurment and Instrumentation: Theory and Application Second Edition*. United States of America: Elsevier Inc.
- Muchlis, A., Ridwan, W., & Nasibu, I. Z. 2021. Rancang Bangun Mesin CNC (Computer Numerical Control) Laser dengan Metode Design for Assembly. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering (JJEEE)*, 3(1), 23–27.
- Nugroho, A. B., Auliq, M. A., & Alrasyid, M. Z. 2020. Analisa Perbandingan Performansi Akurasi Mesin CNC (Computer Numerical Control) Router Berbasis Mach 3 dan Arduino Uno Menggunakan Metode SQC (Statistical Quality Control). *Jurnal Teknik Elektro Dan Komputasi (ELKOM)*, 2(2), 75–86.
- Nugroho, A., & Sujadi. 2019. Pengaruh Penggunaan Mesin CNC Router Terhadap Waktu Standar Pengerjaan Ornamen Desain Interior. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 4(2), 86–92.
- Pratama, R., Pardede, A., & Novriyenni. 2022. Rancang Bangun Mesin CNC Mini Untuk Membuat Mini Sketsa Berbasis Arduino. *Jurnal Teknik Informatika Kaputama (JTIK)*, 6(2), 607-618.
- Putra, M.A., Ismail, I., Sani, A.A., Rachmat, D.S. 2022. Pengarus *Feedrate* dan *Deep of Cut* Proses Permesinan CNC Router Terhadap Kekasaran Permukaan Akrilik. *Machinery Jurnal Teknologi Terapan*. 3(3), 87-92.
- Rahman, A. Z., Prabowo, T. S., Santika, P. M., Teknologi, B., Perkakas, M., & Otomasi, D. 2019. Desain dan Manufaktur Mesin CNC Plasma 3 Sumbu PT. Bangun Mesin Sejahtera. *Jurnal Teknik Mesin*. 3(1), 1-6.
- Rahmi, K., Dharma, S., Kamil, I. 2021. Rancang Bangun Mesin CNC Router 3-Sumbu Berbasis Mikrokontroler Mach 3. *Konferensi Nasional Sosial dan Engineering Politeknik Negeri Medan*, 4(1), 684-689.

- Setiawan, B., Rasma., & Djunaedi, T. 2020. Rancang Bangun Mesin CNC Router Portable Dengan Dimensi 1219 x 609 mm Untuk Skala Laboratorium. *Jurnal Infomatek*, 22(1), 15-22.
- Supriyadi, S., Burhanudin, A., Setiyoadi, Y., & Setyono, I. B. 2020. *Lembaga Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(3), 662–677.
- Syahriza, Firsya, T., & Ibrahim, M. 2015. Rancang Bangun Mesin CNC 4 Axis Berbasis PC (Personal Computer). *Jurnal Teknik Mesin Unsyiah*, 3(2), 75–79.