

ANALISIS KINERJA MESIN CNC *HOT WIRE 2 – AXIS* BERBASIS *BLUETOOTH* UNTUK PRODUKSI *FOAM HOME INDUSTRY*

Audri Nur Julianingsih; Umi Fadlilah, S.T., M. Eng, Ph. D

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Perkembangan teknologi otomasi mendorong pemanfaatan mesin *Computer Numerical Control* (CNC) sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas proses produksi, termasuk pada industri rumahan (*home industry*) yang memproduksi produk berbahan *foam*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja mesin CNC *Hot Wire 2-Axis* berbasis *Bluetooth* dalam proses produksi *foam* berdasarkan aspek akurasi dimensi, kualitas hasil pemotongan, serta efektivitas sistem kendali. Mesin menggunakan *controller* berbasis GRBL dengan komunikasi *Bluetooth* sebagai media pengiriman *G-code*, motor *stepper* NEMA 17 sebagai penggerak sumbu X dan Y, serta kawat pemanas (*hot wire*) sebagai media pemotong. Metode penelitian meliputi perancangan dan kalibrasi sistem, pengujian konektivitas *Bluetooth*, pengujian pergerakan sumbu, pengujian hasil pemotongan pada beberapa bentuk objek *foam*, pengukuran dimensi menggunakan jangka sorong digital, serta analisis persentase *error* antara dimensi rancangan dan hasil aktual. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin mampu menghasilkan pemotongan *foam* dengan tingkat presisi yang baik. Nilai rata-rata *error* yang diperoleh sebesar 0,370% pada sumbu X dan 0,322% pada sumbu Y, sehingga penyimpangan dimensi masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Selain itu, sistem komunikasi *Bluetooth* dan pengendali GRBL mampu bekerja secara stabil selama proses pemotongan berlangsung. Berdasarkan hasil analisis, mesin CNC *Hot Wire 2-Axis* berbasis *Bluetooth* mampu meningkatkan efisiensi proses produksi, menghasilkan kualitas pemotongan yang lebih presisi dibandingkan metode manual, serta layak diterapkan untuk mendukung produksi *foam* pada skala *home industry*.

Kata Kunci : *Analisis kinerja, CNC Hot Wire 2-Axis, Bluetooth, foam, home industry, presisi, GRBL.*

Abstract

The rapid advancement of automation technology has encouraged the adoption of *Computer Numerical Control* (CNC) machines as a solution to improve production efficiency and product quality, particularly in home industries engaged in foam manufacturing. This study aims to analyze the performance of a *Bluetooth*-based 2-Axis CNC *Hot Wire* machine for foam production in terms of dimensional accuracy, cutting quality, and control system effectiveness. The machine employs a GRBL-based controller with *Bluetooth* communication for transmitting *G-code*, NEMA 17 stepper motors to drive the X- and Y-axes, and a hot wire as the cutting element. The research methodology includes system design and calibration, *Bluetooth* connectivity testing, axis movement testing, cutting experiments on various foam objects, dimensional measurements using a digital caliper, and error analysis by comparing the designed dimensions with the actual cutting results. The experimental results demonstrate that the machine is capable of producing foam cuts with high precision. The average error values obtained were 0.370% on the X-axis and 0.322% on the Y-axis, indicating that the dimensional deviations remain within acceptable tolerance limits. Furthermore, the *Bluetooth* communication system and the GRBL-based controller operated reliably throughout the cutting process. Based on the performance analysis, the *Bluetooth*-based 2-Axis CNC *Hot Wire* machine improves production efficiency, produces more precise cutting results than conventional manual methods, and is suitable for supporting foam production in home industry applications.

Keywords: performance analysis, CNC Hot Wire 2-Axis, Bluetooth, foam, home industry, precision, GRBL.

1. PENDAHULUAN

Transformasi teknologi pada masa Revolusi Industri 4.0 di Indonesia telah mendorong peningkatan penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi pada berbagai sektor industri. Kondisi tersebut juga mencakup industri manufaktur berskala kecil, salah satunya pada bidang produksi berbahan foam. (Diyani et al. 2024). Perkembangan tersebut memberikan dampak signifikan terhadap bidang mekanika dan elektronika yang terus mengalami inovasi seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem produksi yang efisien, akurat, dan kompetitif (Yuniar Pratiwi et al. 2025). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan penerapan teknologi modern melalui pengembangan alat atau mesin yang memanfaatkan sistem otomatis, robotika, serta sensor terintegrasi. Penerapan teknologi tersebut bertujuan untuk meningkatkan efisiensi proses kerja, memperbaiki tingkat ketelitian, dan mendukung peningkatan daya saing industri. (Harahap et al. 2025).

Pada masa sebelum berkembangnya teknologi otomasi, kegiatan industri dilaksanakan melalui sistem produksi konvensional yang sepenuhnya bergantung pada keterampilan tenaga kerja manusia secara manual (Adha, Asyhadie, and Kusuma 2020). Namun, seiring dengan kemajuan teknologi, sistem tersebut mengalami peralihan menuju proses produksi berbasis otomasi dan robotika (Maulan et al. 2025). Peralihan ini didorong oleh tuntutan industri modern terhadap proses kerja yang lebih cepat, efisien, dan memiliki tingkat presisi tinggi, sehingga diperlukan penggunaan mesin berbasis teknologi seperti *Computer Numerical Control (CNC)* (Rajib et al. 2025).

Penelitian sebelumnya yang dilakukan berfokus pada lingkungan Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM), terutama pada industri kreatif yang memanfaatkan material styrofoam terkait penerapan sistem otomasi untuk mendukung pengembangan proses kerja. (Ghiffari and Aryanto 2026). Keberadaan UMKM memberikan kontribusi yang signifikan terhadap perekonomian nasional serta memiliki peluang pengembangan yang dapat terus ditingkatkan secara berkelanjutan (Arifa et al. 2025). Penerapan sistem otomasi pada sektor ini diharapkan mampu meningkatkan efektivitas proses produksi, menjaga konsistensi hasil, serta meningkatkan kualitas produk, khususnya pada industri kreatif berbasis material *foam* atau *styrofoam* (Firmansyah 2025).

Industri pengolahan *foam (styrofoam)* skala rumahan di Indonesia masih banyak menggunakan metode pemotongan secara konvensional, seperti pisau atau kawat biasa (Fahrizal et al. 2022). Metode ini menghasilkan tingkat akurasi yang rendah, waktu produksi yang relatif lama, serta membutuhkan tenaga kerja dalam jumlah besar (Syafiq and Hayati 2020). Selain itu, bentuk produk

yang tidak seragam dapat menurunkan kualitas hasil, baik untuk kebutuhan kemasan, maket arsitektur, maupun elemen dekoratif.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah teknologi *CNC hot wire*, yaitu metode pemotongan *foam* menggunakan kawat panas yang dikendalikan secara numerik sehingga mampu menghasilkan potongan yang lebih halus dan presisi (Haq et al. 2019). Penerapan teknologi tersebut memungkinkan proses perancangan objek dua dimensi maupun tiga dimensi dilakukan dengan tingkat ketelitian yang lebih baik dibandingkan metode pengerjaan secara manual (Fahrizal et al. 2022). Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan mesin *CNC hot wire* berbasis mikrokontroler dan motor *Stepper* dengan tingkat ketelitian tinggi, bahkan mencapai akurasi lebih dari 95% (Haq et al. 2019). Namun, sebagian besar sistem tersebut masih bergantung pada komputer atau laptop, sehingga kurang fleksibel untuk diterapkan pada industri skala rumahan (Ilman and Mustofa, AhmadAs'ad 2021).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penggunaan sistem kendali *Bluetooth* yang dipadukan dengan teknologi *Bluetooth* menjadi solusi yang lebih praktis dan ekonomis. Sistem ini memungkinkan pengendalian mesin *CNC* melalui perangkat *Android* tanpa memerlukan komputer tambahan, sehingga lebih fleksibel dan mudah (Nugroho and Sumariyah 2019).

Perancangan dan pengembangan sistem Mesin *CNC 2-Axis* yang berjudul “ANALISIS KINERJA MESIN *CNC HOT WIRE 2 – AXIS* BERBASIS *BLUETOOTH* UNTUK PRODUKSI *FOAM HOME INDUSTRY*”. Pada penelitian sebelumnya digunakan metode manual berbasis *Arduino* yang tidak menggunakan *Bluetooth*, sedangkan pada penelitian ini menerapkan sistem kendali berbasis *Bluetooth* dengan desain alat yang diperkirakan memiliki tinggi total 80 cm, panjang rangka dasar 120 cm, dan lebar keseluruhan sekitar 30 cm, sehingga lebih *portable*. Penelitian ini difokuskan pada perancangan serta pembuatan konstruksi mekanik mesin *CNC hot wire* dua sumbu dengan desain yang sederhana dan memiliki kekuatan struktur yang baik, sehingga dapat diterapkan untuk proses pemotongan material *foam* pada industri rumahan. Selain itu, sistem ini juga dirancang dengan mengimplementasikan komunikasi *Bluetooth* sebagai media pengiriman perintah dari perangkat pengguna ke mesin. Selanjutnya, dilakukan analisis terhadap tingkat efektivitas dan efisiensi penggunaan mesin *CNC hot wire 2-axis* berbasis *Bluetooth* dibandingkan dengan metode pemotongan *foam* secara manual, guna menilai keunggulan sistem yang dikembangkan.

2. METODE

2.1 Tahap Penelitian

Tahapan awal penelitian dilakukan melalui studi literatur untuk memperoleh referensi dan teori yang berkaitan dengan mesin *CNC Hot Wire 2-Axis*, sistem kendali *Bluetooth*, motor *stepper*,

firmware GRBL, proses pemotongan *foam*, serta teknologi pendukung yang digunakan dalam pengembangan sistem.

Tahap berikutnya adalah perancangan sistem, yang meliputi desain mekanik mesin *CNC Hot Wire 2-Axis*, penyusunan rangkaian elektronika, perancangan sistem kendali *Bluetooth*, serta konfigurasi *firmware GRBL* untuk menerjemahkan perintah *G-code* menjadi gerakan pada sumbu X dan Y. Selain itu dilakukan perancangan sistem pengaturan suhu *hot wire* menggunakan metode *Pulse Width Modulation (PWM)* agar proses pemotongan berlangsung secara optimal.

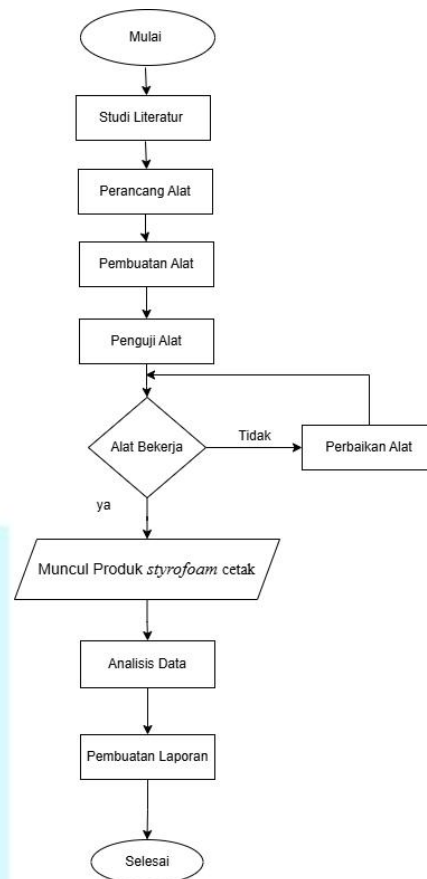
Setelah proses perancangan selesai, dilakukan tahap pembuatan dan perakitan alat sesuai dengan desain yang telah direncanakan. Seluruh komponen mekanik, sistem penggerak, modul *Bluetooth*, *driver* motor, serta sistem pemanas dirakit menjadi satu kesatuan sehingga mesin dapat beroperasi sesuai fungsi yang diharapkan.

Tahap selanjutnya adalah pengujian sistem, yang meliputi pengujian konektivitas *Bluetooth*, pergerakan sumbu X dan Y, kalibrasi motor *stepper*, pengaturan suhu *hot wire*, serta pengujian proses pemotongan *foam*. Apabila ditemukan *error* atau ketidaksesuaian selama pengujian, dilakukan perbaikan pada sistem kemudian dilakukan pengujian kembali hingga mesin bekerja dengan baik.

Tahap berikutnya adalah analisis data, yaitu menganalisis hasil pengujian yang meliputi tingkat akurasi pergerakan sumbu, kualitas hasil pemotongan *foam*, kestabilan sistem pemanas, efektivitas komunikasi *Bluetooth*, serta perhitungan persentase *error* pada hasil pemotongan. Analisis dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam meningkatkan efisiensi dan presisi proses produksi *foam* pada *home industry*.

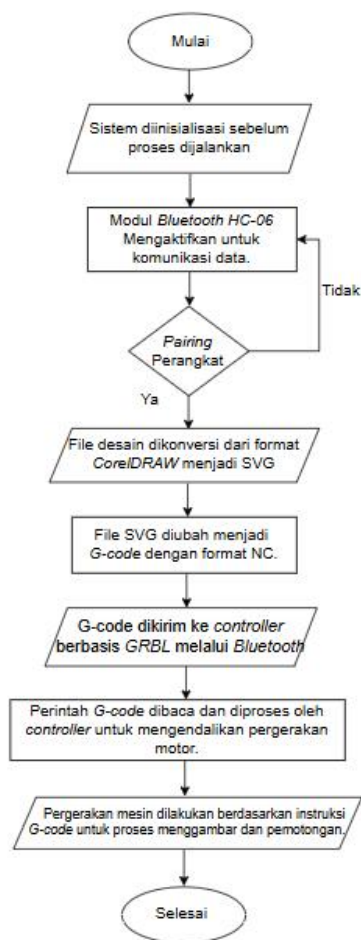
Tahap terakhir adalah penyusunan laporan penelitian yang memuat seluruh proses perancangan, implementasi, pengujian, analisis hasil, serta kesimpulan penelitian.

2.2 Flowchart Penelitian

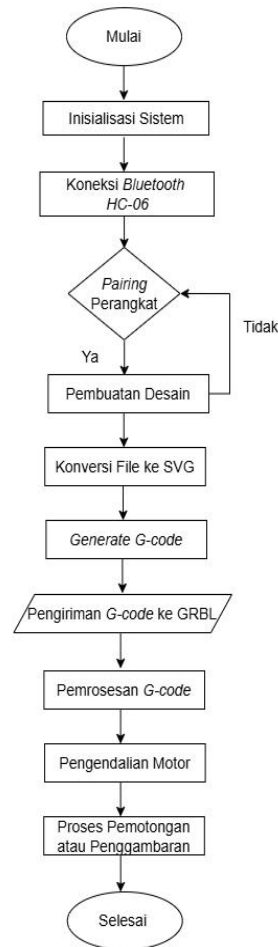


Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

Gambar 1 menunjukan , tahapan penelitian diawali melalui studi literatur yang dilakukan untuk memperoleh referensi dan teori pendukung sebagai dasar pelaksanaan penelitian. Tahap selanjutnya merupakan proses perancangan alat, yaitu proses merancang sistem serta menentukan kebutuhan komponen yang digunakan. Setelah tahap perancangan diselesaikan, penelitian dilanjutkan dengan proses implementasi berupa pembuatan alat sesuai rancangan yang telah ditetapkan. Tahap berikutnya dilakukan pengujian untuk menilai kemampuan kerja dan performa system. Apabila alat belum menunjukkan kinerja yang optimal, dilakukan proses perbaikan dan penyempurnaan alat dan sistem diuji kembali hingga alat dapat berfungsi secara optimal. Jika alat telah bekerja sesuai perancangan, maka sistem akan menghasilkan produk *styrofoam* cetak sebagai keluaran. Selanjutnya dilakukan analisis data, kemudian pembuatan laporan hingga proses penelitian dinyatakan selesai.



a. Flowchart perancangan software



b. Flowchart sistem

Gambar 2. Flowchart proses pergerakan mesin untuk menggambar dan memotong

Gambar 2 menunjukkan *flowchart* perancangan *software* yang menggambarkan alur kerja sistem dalam mengolah data desain hingga menjadi instruksi pergerakan mesin *CNC Hot Wire 2-Axis*. Proses diawali dengan inisialisasi sistem untuk mempersiapkan seluruh parameter yang diperlukan sebelum sistem dijalankan. Selanjutnya, modul *Bluetooth* HC-06 diaktifkan sebagai media komunikasi data antara perangkat pengguna dan sistem kendali. Setelah itu dilakukan proses *pairing* perangkat. Apabila proses *pairing* belum berhasil, sistem akan mengulangi proses koneksi hingga perangkat berhasil terhubung.

Setelah koneksi berhasil, file desain yang dibuat menggunakan *CorelDRAW* dikonversi ke dalam format SVG. Selanjutnya, file SVG dikonversi menjadi *G-code* berformat NC yang berisi perintah-perintah pergerakan mesin. Berkas *G-code* kemudian dikirim ke *controller* berbasis GRBL melalui komunikasi *Bluetooth* untuk diproses lebih lanjut.

Pada tahap berikutnya, *controller* membaca dan menerjemahkan setiap perintah *G-code* menjadi sinyal kendali yang mengatur pergerakan motor pada sumbu X dan Y. Pergerakan mesin dilakukan sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan pada *G-code*, sehingga proses menggambar maupun pemotongan *foam* dapat berlangsung secara otomatis, presisi, dan sesuai dengan desain yang telah dibuat. Setelah seluruh instruksi berhasil dieksekusi, proses dinyatakan selesai.

Gambar 2b menunjukkan, *flowchart* sistem menggambarkan alur kerja keseluruhan sistem yang melibatkan interaksi antara perangkat lunak, komunikasi, dan perangkat keras. Proses dimulai dengan inisialisasi sistem yang mencakup pengaturan komunikasi serial, *Bluetooth*, motor, serta komponen tambahan seperti *hot wire*. Selanjutnya modul *Bluetooth HC-06* diaktifkan untuk memungkinkan komunikasi dengan perangkat pengirim data. Sistem kemudian melakukan proses *pairing*, di mana jika koneksi belum berhasil maka, akan dilakukan pengulangan hingga perangkat terhubung. Setelah koneksi berhasil, pengguna menyiapkan desain dalam format *SVG* yang kemudian dikonversi menjadi *G-code*. Data *G-code* dikirim ke *controller* berbasis *Arduino* yang menggunakan *GRBL* untuk membaca dan memproses instruksi tersebut. Proses pengolahan instruksi *G-code* dilakukan oleh sistem untuk mengatur driver motor sehingga pergerakan mesin pada masing-masing sumbu dapat berjalan sesuai perintah. Proses ini menghasilkan keluaran berupa gerakan mesin sesuai desain yang diinginkan, dan sistem berakhir setelah seluruh proses selesai.

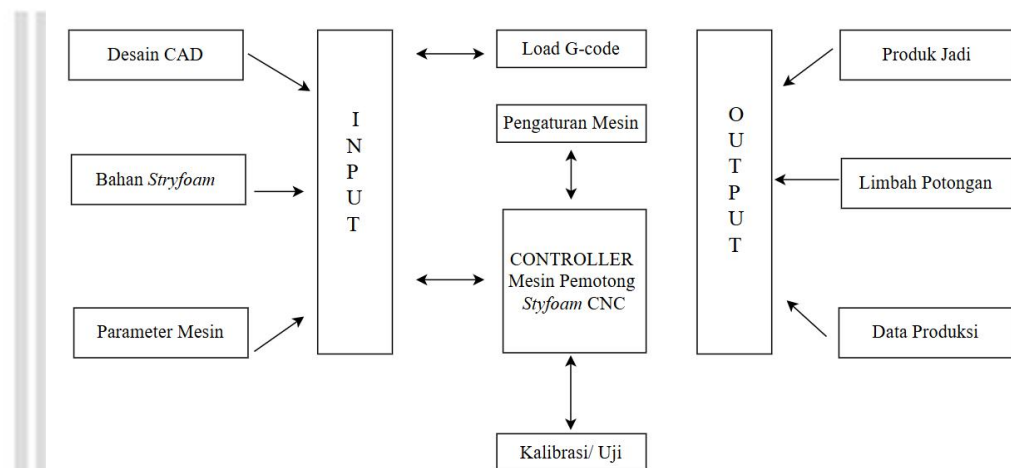
2.3 Persiapan Alat dan Bahan

Proses pembuatan mesin CNC *Hot Wire 2-Axis* dengan sistem kendali *Bluetooth* untuk aplikasi produksi *foam* skala *home industry* memerlukan persiapan berbagai alat dan bahan sebagai pendukung pelaksanaan pembuatan sistem. Pada sistem ini, proses pemotongan *foam* dilakukan secara otomatis dengan memanfaatkan kendali numerik. Sistem dirancang agar dapat dikontrol secara nirkabel melalui komunikasi *Bluetooth*, sehingga memudahkan pengguna dalam mengirimkan perintah pemotongan berupa *G-code* dari perangkat seperti laptop atau *smartphone*. Pada proses kerjanya, data perintah dikirim melalui modul *Bluetooth* menuju *controller*, kemudian diproses menggunakan *firmware* CNC seperti *GRBL* untuk mengontrol pergerakan motor *stepper* pada sumbu X dan Y. Selanjutnya, motor akan menggerakkan mekanisme pemotong, sementara kawat pemanas (*hot wire*) akan aktif untuk melakukan proses pemotongan *foam* secara presisi. Sistem ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, dan konsistensi hasil produksi dibandingkan metode manual. Beberapa komponen digunakan dalam penelitian ini untuk mendukung pengembangan sistem, meliputi modul *Bluetooth HC-06* untuk transmisi data secara nirkabel, CNC Shield, *driver stepper* A4988/DRV8825, motor *stepper* sebagai penggerak sumbu X

dan Y, rangka mekanik CNC, *power supply*, serta kawat *nichrome* sebagai elemen pemanas (*hot wire*). Selain itu, digunakan pula komponen pendukung seperti *limit switch*, kipas pendingin, dan kabel penghubung untuk memastikan sistem bekerja secara optimal. Motor *stepper* yang digunakan memiliki spesifikasi tegangan kerja 12–24 VDC dengan kemampuan presisi tinggi dalam pengaturan posisi, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi mesin CNC.

2.4 Perancangan Sistem Blok Diagram

Proses realisasi alat dilaksanakan berdasarkan urutan seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Blok Diagram Sistem

Gambar 3 menunjukkan diagram blok sistem mesin pemotong *styrofoam* CNC yang terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *input*, proses, dan *output*. Diagram ini menggambarkan aliran data dan interaksi antar komponen dalam sistem mulai dari masukan hingga menghasilkan keluaran berupa produk yang diinginkan.

Pada bagian *input*, terdapat tiga komponen utama yang berfungsi sebagai masukan sistem, yaitu desain CAD, bahan *styrofoam*, dan parameter mesin. Desain CAD digunakan sebagai acuan bentuk dan dimensi produk yang akan dipotong. Bahan *styrofoam* berfungsi sebagai material utama yang akan diproses oleh mesin. Sementara itu, parameter mesin digunakan untuk menentukan kondisi operasi mesin, seperti kecepatan pemotongan, suhu kawat pemanas, dan parameter lainnya yang memengaruhi kualitas hasil pemotongan.

Data dari bagian *input* kemudian diteruskan ke bagian proses, yang terdiri dari beberapa tahapan. Tahap pertama adalah *load G-code*, yaitu proses memasukkan kode program hasil konversi desain CAD ke dalam sistem kontrol mesin. *G-code* berisi instruksi gerakan yang akan dijalankan oleh mesin selama proses pemotongan. Selanjutnya dilakukan pengaturan mesin, yang meliputi konfigurasi parameter operasi agar sesuai dengan karakteristik material dan desain yang akan dibuat.

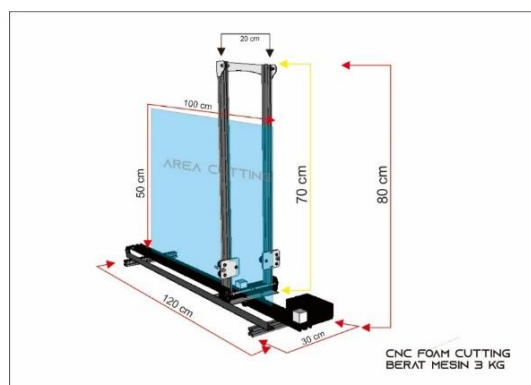
Tahap inti pada bagian proses dilakukan oleh *controller* mesin pemotong *styrofoam* CNC. *Controller* berfungsi sebagai pusat kendali sistem yang menerima data dari *input*, mengolah instruksi *G-code*, serta mengatur pergerakan aktuator dan elemen pemotong sesuai program yang telah ditentukan. Selain itu, *controller* juga berkomunikasi dengan modul pengaturan mesin untuk memastikan seluruh parameter operasi berjalan sesuai dengan nilai yang telah ditetapkan.

Untuk menjamin kualitas hasil pemotongan, sistem dilengkapi dengan proses kalibrasi dan uji. Tahap ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja mesin serta melakukan penyesuaian apabila ditemukan penyimpangan pada hasil pemotongan. Hasil pengujian digunakan sebagai umpan balik (*feedback*) bagi *controller* sehingga parameter operasi dapat diperbaiki dan dioptimalkan sebelum proses produksi dilanjutkan.

Hasil dari seluruh tahapan proses kemudian diteruskan ke bagian *output*. *Output* yang dihasilkan terdiri dari produk jadi, yaitu hasil pemotongan *styrofoam* sesuai desain yang telah direncanakan, limbah potongan, yaitu sisa material yang tidak digunakan dalam produk akhir, serta data produksi yang berisi informasi terkait proses pemotongan, parameter operasi yang digunakan, dan hasil produksi yang diperoleh. Data produksi tersebut dapat dimanfaatkan untuk keperluan *monitoring*, evaluasi, dan pengembangan sistem pada tahap berikutnya.

2.5 Perancangan Hardware

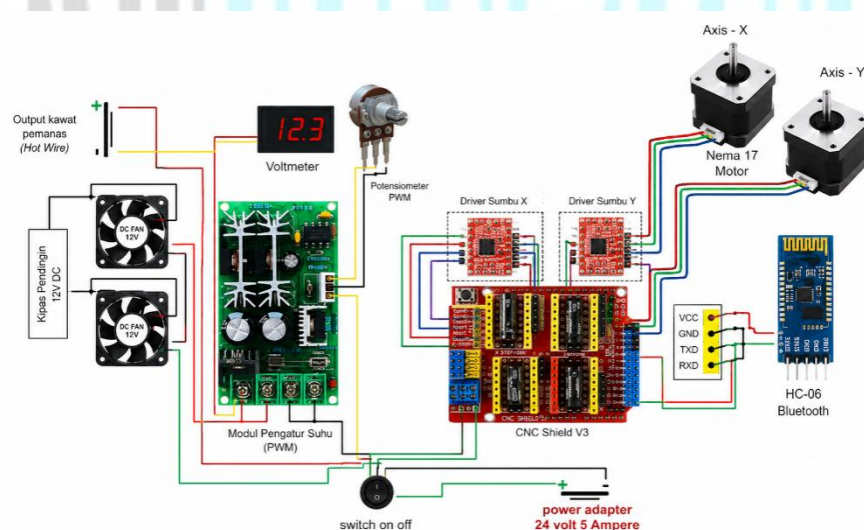
Gambar 4 merupakan Desain 3D *Hot Wire* 2-Axis mesin pemotong yang akan dibuat yang menjadi acuan nantinya saat pembuatan alat.



Gambar 4. Desain 3D Mesin CNC *hot wire* 2-axis

Pada Gambar 4 ditampilkan desain 3D mesin pemotong *hot wire* 2-axis berbasis mekaniklinear dengan area pemotongan (*cutting area*). Mesin ini dirancang dengan tinggi total sekitar 80 cm, panjang rangka dasar 120 cm, serta lebar keseluruhan kurang lebih 30 cm. Sistem menggunakan rangka vertikal ganda yang berfungsi sebagai penopang mekanisme gerak naik-turun

pada sumbu Z. Tinggi efektif area kerja vertikal mencapai 70 cm, sedangkan tinggi total rangka adalah 80 cm. Pada bagian tengah terdapat area pemotongan (*cutting area*) dengan dimensi kerja material sebesar 100 cm pada arah horizontal (sumbu X) dan 50 cm pada tinggi area efektif pemotongan. Area ini merupakan bidang kerja utama tempat material diproses. Bagian dasar sistem dilengkapi dengan rel linear sepanjang 120 cm yang berfungsi sebagai jalur pergerakan meja atau *carriage* pada sumbu X. Sistem transmisi gerak menggunakan *belt* dengan lebar 6 mm yang berfungsi untuk mentransmisikan putaran motor menjadi gerakan translasi horizontal. Pada sisi kanan bawah terdapatudukan motor serta komponen penggerak dengan panjang area sekitar 30 cm. Bagian ini berfungsi sebagai tempat motor, *pulley*, serta sistem transmisi. Struktur rangka vertikal dirancang kokoh untuk menopang beban aktuator dan *tool head* selama proses pemotongan berlangsung. Berat mesin diperkirakan sekitar 3 kg sesuai dengan spesifikasi desain. Rangkaian *hardware* dari mesin pemotong *hot wire 2-axis* ini ditempatkan di dalam alat, yang sebelumnya telah dirakit dalam *box* mikrokontroler. Mesin yang dikembangkan dalam penelitian ini ditujukan untuk penggunaan pada skala industri rumahan dan berpotensi untuk diterapkan serta dikembangkan pada lingkungan Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM).



Gambar 5. Rangkaian hardware Mesin *CNC hot wire 2-axis*

Pada Gambar 5 menunjukkan rancangan rangkaian *hardware* mesin *CNC Hot Wire 2-Axis* yang terdiri atas sistem kendali, sistem penggerak, sistem pemanas, serta sistem komunikasi *Bluetooth* yang saling terintegrasi. Seluruh komponen memperoleh sumber daya dari *power supply* 24 V 5 A yang berfungsi sebagai catu daya utama untuk mengoperasikan sistem.

Pada bagian penggerak, CNC Shield V3 digunakan sebagai antarmuka untuk menghubungkan *driver stepper* A4988 dengan motor *stepper* NEMA 17 pada sumbu X dan Y. Kedua motor tersebut berfungsi menggerakkan mekanisme mesin sesuai lintasan yang dihasilkan dari data *G-code*. Pengaturan arus pada *driver* A4988 memungkinkan motor bekerja lebih stabil dan menghasilkan pergerakan yang presisi selama proses pemotongan. Sistem komunikasi menggunakan modul *Bluetooth* HC-06 yang berfungsi sebagai media pengiriman data secara nirkabel dari perangkat pengguna menuju sistem kendali. Melalui komunikasi tersebut, data *G-code* dapat dikirim untuk diproses sehingga mesin mampu menjalankan proses pemotongan sesuai desain yang telah dibuat.

Pada bagian pemanas, digunakan modul pengatur suhu berbasis *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dilengkapi potensiometer sebagai pengatur besar kecilnya daya yang diberikan ke kawat pemanas (*hot wire*). Besarnya tegangan keluaran dipantau menggunakan voltmeter sehingga pengguna dapat menyesuaikan suhu pemotongan sesuai karakteristik material *foam*. Selain itu, dua buah kipas pendingin 12 V dipasang untuk menjaga suhu modul PWM agar tetap stabil selama proses operasi berlangsung. Secara keseluruhan, rangkaian *hardware* ini mengintegrasikan sistem komunikasi *Bluetooth*, sistem penggerak motor, dan sistem pengendalian suhu *hot wire* sehingga mampu menghasilkan proses pemotongan *foam* yang lebih efisien, presisi, dan mudah dioperasikan pada skala *home industry*.

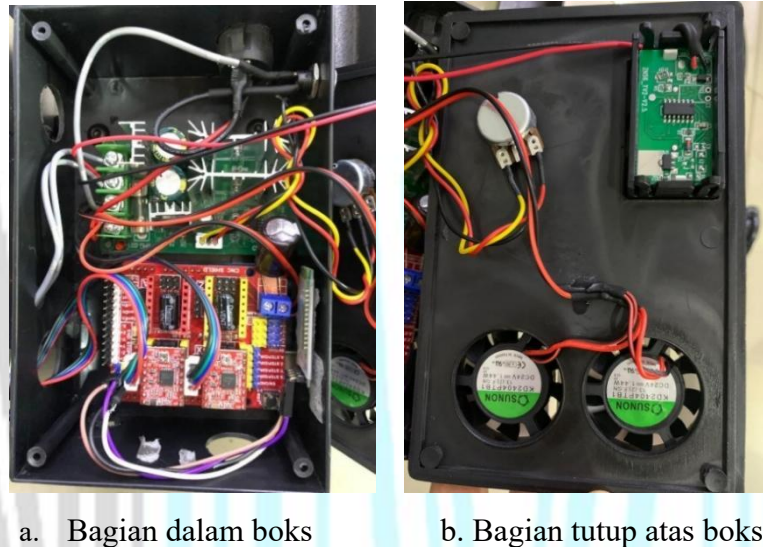
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Realisasi Alat

3.1.1. Sistem Electrical

Sistem *electrical* pada mesin *CNC Hot Wire 2-Axis* dirancang untuk mengendalikan pergerakan dan proses pemotongan secara terintegrasi menggunakan beberapa komponen utama. Sistem kendali berfungsi sebagai *controller* yang mengatur seluruh proses berdasarkan perintah yang diterima. Untuk mempermudah koneksi dengan aktuator digunakan CNC Shield V3 sebagai *interface* penghubung ke *driver* motor. Pergerakan motor pada sumbu X dan Y dikendalikan oleh *driver* A4988 yang berfungsi mengatur arus dan langkah (*step*) motor *stepper* agar dapat bergerak secara presisi sesuai instruksi *G-code*. Komunikasi data antara perangkat pengguna dan sistem dilakukan secara nirkabel menggunakan modul *Bluetooth* HC-06 sehingga perintah dapat dikirim tanpa menggunakan kabel. Selain itu, digunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengatur tegangan atau daya yang diberikan pada kawat pemanas (*hot wire*), sehingga suhu dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses pemotongan. Seluruh sistem memperoleh sumber daya dari *power supply* 24 V 5 A

yang kemudian didistribusikan ke setiap komponen sesuai kebutuhan tegangan dan arusnya. Dengan integrasi sistem kendali, komunikasi *Bluetooth*, sistem penggerak motor, serta pengendalian suhu *hot wire*, mesin mampu bekerja secara otomatis, stabil, dan presisi dalam melakukan proses pemotongan *foam* sesuai dengan desain yang telah dibuat.



Gambar 6. Rangkaian Mikrokontroler

3.2. Kalibrasi Mesin

Sistem *electrical* pada mesin *CNC Hot Wire 2-Axis* dirancang untuk mengendalikan pergerakan dan proses pemotongan secara terintegrasi menggunakan beberapa komponen utama. Sistem kendali (*controller*) berfungsi mengatur seluruh proses berdasarkan perintah yang diterima melalui komunikasi *Bluetooth*. Untuk menghubungkan sistem kendali dengan aktuator digunakan *CNC Shield V3* sebagai *interface* menuju *driver* motor. Pergerakan motor pada sumbu X dan Y dikendalikan oleh *driver* A4988 yang berfungsi mengatur arus dan langkah (*step*) motor *stepper* agar dapat bergerak secara presisi sesuai instruksi *G-code*. Komunikasi data dilakukan menggunakan modul *Bluetooth* HC-06 sehingga proses pengiriman data dapat dilakukan secara nirkabel. Selain itu, digunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengatur daya yang diberikan pada kawat pemanas (*hot wire*), sehingga suhu pemotongan dapat disesuaikan dengan karakteristik material *foam*. Seluruh sistem memperoleh catu daya dari *power supply* 24 V 5 A yang kemudian didistribusikan ke setiap komponen sesuai kebutuhan tegangan dan arusnya. Melalui proses kalibrasi ini diperoleh parameter kerja yang optimal sehingga sistem mampu menghasilkan pergerakan motor yang stabil, pengendalian suhu *hot wire* yang sesuai, serta tingkat presisi pemotongan yang tinggi.

3.2.1. Parameter Kalibrasi Sumbu X dan Y

Parameter tegangan dan suhu pada alat ini yaitu untuk mengatur suhu pada *hot wire* dengan menggunakan kalibrasi tegangan dan arus agar didapatkan suhu yang tepat untuk proses pemotongan *styrofoam* secara tepat dan maksimal.

Tabel 1.
kalibrasi
dan Y

Parameter
Sumbu X

<i>Stepper Motor</i>	<i>Deg/Step</i> - : 1.8 <i>Steps/rev</i> - : 200
<i>Micro Stepping</i>	<i>Pulse/Step</i> - : 1/16 <i>Pulse/rev</i> - : 3200
<i>Pulley Teeth</i>	<i>Pulley Teeth</i> : 20
<i>Belt Pitch</i>	<i>Pitch</i> - : 2 <i>Lead</i> (mm/rev) - : 40
<i>Result</i>	*Steps per mm - : 80 <i>Resolution</i> (mm/Step)- : 0.0125

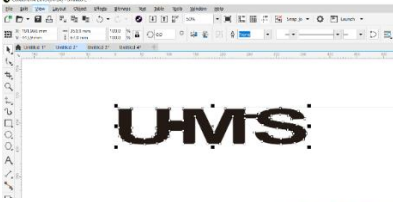
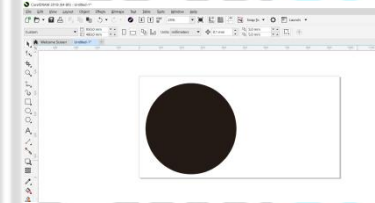
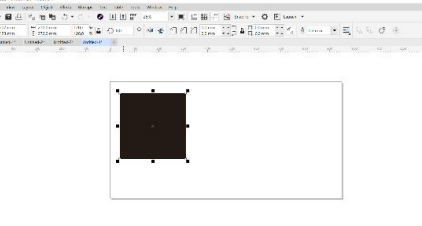
Tabel 1 menunjukkan parameter kalibrasi sumbu X dan Y pada motor *Stepper nema 17*. Dengan jumlah *pulley teeth* sebanyak 20 *teeth* dan *belt pitch* sebanyak 2 *pitch*, maka, kondisi *default Stepper motor* yaitu 1,8 *deg/Step* dengan jumlah *micro Step* sebanyak 1/16 *pulse/Step*. Berdasarkan spesifikasi *default* komponen mesin yang digunakan maka, hasil kalibrasi sumbu X dan Y yaitu 80 *Steps per mm*.

3.3. Hasil Pengujian

3.3.1. Pengujian Pemotongan *Styrofoam*

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa evaluasi dimensi *styrofoam* dilakukan melalui perbandingan antara ukuran desain pada perangkat lunak dengan ukuran hasil pemotongan yang diperoleh secara aktual.

Tabel 4. Pemotongan *Styrofoam* dan hasil pengukuran

Dimensi <i>Software</i> (mm ²)	Hasil Pengukuran (mm ²)
PERCOBAAN (410 x 75) 	(408x71) 
UMS (350 x 67) 	(349 x 66) 
LOGO LINGKARAN (430 x 430) 	(429 x 429) 
LOGO PERSEGI (270 x 270) 	(269 X 269) 

3.3.2. Perhitungan Persentase Error pada pada sumbu X dan Y

Persentase *error* pada arah X dan Y diperoleh dari hasil perbandingan antara dimensi rancangan dengan hasil pengukuran *styrofoam* setelah proses pemotongan. Munculnya nilai error dipengaruhi oleh terjadinya pelelehan material selama proses pemotongan, sehingga menyebabkan

perbedaan ukuran pada kedua sumbu. Selisih dimensi tersebut kemudian digunakan untuk menentukan nilai persentase *error*. Perhitungan *error* mengacu pada Persamaan 5. sedangkan rumus persentase *error* diketahui dari Persamaan 6 (Kurniawan, Eddy. Syaifurrahman 2021).

$$Error = \frac{DT-DA}{DT} \quad (5)$$

$$\% Error = Error \times 100\% = \frac{DT-DA}{DT} \times 100\% \quad (6)$$

Keterangan dari Persamaan 5 dan 6 :

$E = Error$

$DT =$ Dimensi Tujuan

$DA =$ Dimensi Aktual

Tabel 5. Perhitungan Nilai *Error* pada Sumbu X

Dimensi Tujuan (mm)	Dimensi Aktual (mm)	<i>Error</i>	<i>Error (100%)</i>
410	408	2	0,488 %
350	349	1	0,286 %
430	429	1	0,233 %
270	269	1	0,370 %
Rata-Rata			0,370 %

Berdasarkan Tabel 5, hasil pengujian pada sumbu X menunjukkan bahwa dimensi aktual memiliki selisih yang sangat kecil terhadap dimensi tujuan, yaitu antara 1–2 mm.

Persentase *error* yang diperoleh berkisar antara 0,233% hingga 0,488% Evaluasi Nilai rata-rata *error* yang dihasilkan dari proses pengujian mencapai 0,370%. Persentase *error* yang relatif kecil tersebut mengindikasikan bahwa sistem pada sumbu X mampu menghasilkan tingkat ketelitian dan konsistensi yang baik dalam mencapai dimensi yang ditargetkan. Perbedaan yang terjadi kemungkinan dipengaruhi oleh toleransi mekanik dan ketelitian sistem penggerak.

Tabel 6. Menghitung Nilai *Error* pada Sumbu Y

Dimensi Tujuan (mm)	Dimensi Aktual (mm)	<i>Error</i>	<i>Error (100%)</i>
75	71	4	0,534%
67	66	1	0,149%
430	429	1	0,233%
270	269	1	0,371%
Rata Rata			0,322 %

Berdasarkan Tabel 6, hasil pengujian menunjukkan bahwa dimensi aktual yang dihasilkan memiliki selisih *error* antara 1–4 mm terhadap dimensi tujuan. Dari hasil evaluasi yang dilakukan, diperoleh nilai *error* pada rentang 0,149%–0,534% dengan nilai rata-rata sebesar 0,322%. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa sistem mampu menghasilkan ukuran dengan tingkat ketelitian yang cukup baik untuk ukuran sesuai perencanaan. *Error* terbesar terjadi pada dimensi 75 mm dengan selisih 4 mm, sedangkan dimensi lainnya hanya mengalami selisih 1 mm. Secara keseluruhan, evaluasi hasil pengujian menunjukkan bahwa performa sistem masih memenuhi kriteria toleransi yang diizinkan.

4. PENUTUP

Hasil analisis pengujian pada mesin CNC *hot wire* dua sumbu berbasis dan Bluetooth untuk aplikasi produksi foam skala industri rumahan menunjukkan bahwa penelitian berhasil direalisasikan untuk proses pemotongan material *foam* pada *home industry*. Sistem bekerja dengan menerima perintah berupa *G-code* yang dikirim melalui komunikasi *Bluetooth* dan diproses oleh *controller* berbasis GRBL untuk mengendalikan pergerakan sumbu X dan Y serta proses pemotongan menggunakan *hot wire*. Pengujian menunjukkan bahwa mesin mampu menghasilkan pemotongan yang presisi dengan nilai rata-rata *error* sebesar 0,370% pada sumbu X dan 0,322% pada sumbu Y. Perbedaan dimensi antara desain dan hasil pemotongan dipengaruhi oleh pelelehan material selama proses pemotongan menggunakan *hot wire*. Secara keseluruhan, mesin yang dikembangkan mampu meningkatkan efisiensi proses produksi dan menghasilkan kualitas pemotongan yang lebih baik dibandingkan metode manual, sehingga layak diterapkan pada *home industry*. Adapun saran untuk pengembangan selanjutnya dari mesin CNC 2-axis ini dapat

difokuskan pada peningkatan akurasi dan stabilitas sistem, misalnya dengan menggunakan rangka mekanik yang lebih kokoh. Integrasi perangkat lunak yang lebih *user-friendly* juga disarankan untuk mempermudah pengoperasian oleh pengguna UMKM. Dari sisi keamanan, perlu ditambahkan sistem proteksi seperti *overheat protection* dan *emergency stop* untuk menghindari kerusakan alat maupun risiko kecelakaan. Pengembangan lebih lanjut juga dapat mencakup penambahan sumbu menjadi *3-axis* agar mesin memiliki fleksibilitas pemotongan yang lebih kompleks.

PERSANTUNAN

Penulis memanjatkan rasa syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat, anugerah, dan keberkahan-Nya sehingga penelitian ini berhasil diselesaikan sesuai dengan yang diharapkan. Sehubungan dengan selesainya penelitian ini, penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, doa, serta kontribusi selama proses penelitian dan penyusunan skripsi. Penulis juga memberikan apresiasi kepada diri sendiri yang telah berjuang dan bertahan menghadapi berbagai tantangan selama menempuh pendidikan, mulai dari awal perkuliahan hingga tahap penyelesaian studi. Berbagai kendala dan hambatan yang muncul selama proses penyusunan dapat dilalui berkat kerja keras, semangat, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, sebagai bentuk penghargaan dan rasa syukur, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini, yaitu kepada:

1. Allah SWT yang telah menganugerahkan berbagai kemudahan, kekuatan, dan keberkahan sehingga seluruh rangkaian penelitian serta penyusunan naskah publikasi ini dapat dirampungkan dengan baik
2. Kepada Ibu Umi Fadlilah, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, masukan, serta berbagai saran yang membangun selama proses penelitian dan penyusunan naskah ini. Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih atas waktu, perhatian, kesabaran, serta kesediaan beliau dalam memberikan pendampingan di tengah berbagai kesibukan yang dimiliki. Semoga segala kebaikan, dedikasi, dan ilmu yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik serta senantiasa dilimpahkan kesehatan, keberkahan, dan kesuksesan.
3. Penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada kedua orang tua tercinta yang senantiasa memberikan kasih sayang, dukungan, serta doa dalam setiap langkah kehidupan penulis. Kepada Bapak H. Acang, penulis mengucapkan terima kasih atas segala

pengorbanan, kerja keras, nasihat, dan motivasi yang telah diberikan selama menempuh pendidikan. Meskipun beliau tidak memiliki kesempatan untuk melanjutkan pendidikan hingga jenjang perguruan tinggi, semangat dan perjuangan beliau menjadi teladan yang berharga bagi penulis dalam meraih cita-cita, Penulis juga menyampaikan penghargaan yang mendalam kepada Ibu Hj. Safariyah atas cinta, perhatian, kesabaran, serta dukungan yang tidak pernah berhenti diberikan. Doa dan pengorbanan beliau menjadi sumber kekuatan bagi penulis dalam menghadapi berbagai tantangan selama masa perkuliahan. Berkat dukungan, kepercayaan, dan kasih sayang dari kedua orang tua, penulis dapat menyelesaikan pendidikan hingga jenjang sarjana. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan kesehatan, kebahagiaan, serta keberkahan kepada keduanya.

4. Kepada cinta kasih kedua saudara kandung Ade sri kusmiati dan Dody priyatna. Ucapan terima kasih penulis sampaikan atas kehadiran, dukungan, motivasi, doa, serta perhatian yang telah diberikan selama perjalanan pendidikan. Berkat dukungan, kepercayaan, dan kasih sayang dari kedua saudara kandunng, penulis berhasil menyelesaikan pendidikan pada jenjang sarjana.

5. Penulis menyampaikan terima kasih kepada keluarga besar H. Acang atas segala doa, dukungan, perhatian, serta kasih sayang yang senantiasa diberikan selama masa perkuliahan hingga terselesaikannya skripsi ini. Kehadiran dan dukungan yang diberikan menjadi sumber semangat serta kekuatan bagi penulis dalam menghadapi berbagai tantangan selama proses pendidikan. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang berlipat dari Allah SWT.

6. Rasa terima kasih penulis sampaikan kepada Mirna, Fey, Azdrien, Qila, dan Denisa yang telah menjadi sahabat serta rekan berbagi selama masa perkuliahan. Dukungan, perhatian, kebersamaan, dan bantuan yang diberikan selama proses studi hingga penyusunan skripsi ini menjadi pengalaman berharga yang turut mendukung keberhasilan penulis dalam menyelesaikan pendidikan.

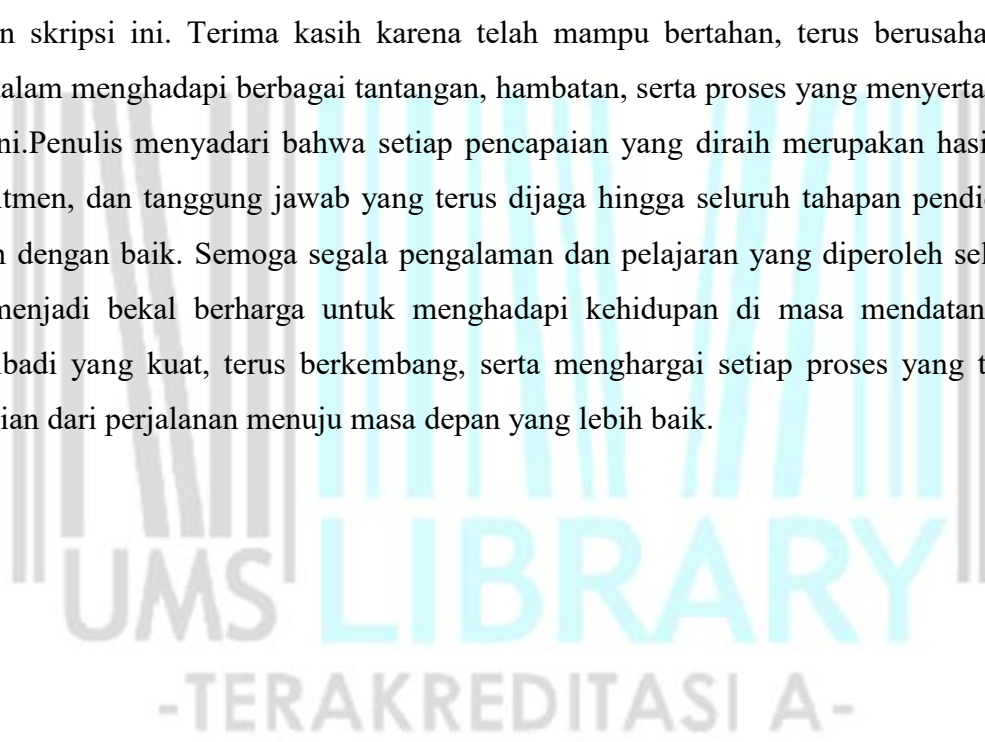
7. Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh teman-teman angkatan 2022 yang telah menjadi bagian dari perjalanan akademik selama masa perkuliahan. Kebersamaan, pengalaman, dukungan, serta berbagai pembelajaran yang diperoleh selama menjalani proses pendidikan menjadi kenangan dan pelajaran berharga bagi penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.

8. Terima kasih penulis sampaikan kepada mahasiswa dengan NIM D400240051 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama perjalanan penyelesaian studi ini. Perhatian, doa, semangat, serta ketulusan yang diberikan menjadi kekuatan bagi penulis dalam menghadapi berbagai tantangan selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi. Terima kasih karena selalu hadir untuk mendengarkan setiap keluh kesah, memberikan motivasi ketika penulis merasa lelah, serta menjadi salah satu alasan bagi penulis untuk terus bangkit dan tidak menyerah. Segala

waktu, kesabaran, dan dukungan yang diberikan akan selalu menjadi bagian yang berharga dalam perjalanan hidup penulis.

9. Penulis turut menyampaikan penghargaan dan rasa terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, doa, serta berbagai bentuk kontribusi selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini. Meskipun tidak dapat disebutkan satu per satu, segala bentuk perhatian dan bantuan yang diberikan memiliki arti yang sangat berharga dalam mendukung terselesaikannya penelitian ini.

10. Pada bagian akhir, penulis memberikan apresiasi kepada diri sendiri atas segala usaha, kesabaran, ketekunan, dan perjuangan yang telah dilalui selama menempuh pendidikan hingga penyelesaian skripsi ini. Terima kasih karena telah mampu bertahan, terus berusaha, dan tidak menyerah dalam menghadapi berbagai tantangan, hambatan, serta proses yang menyertai perjalanan akademik ini. Penulis menyadari bahwa setiap pencapaian yang diraih merupakan hasil dari kerja keras, komitmen, dan tanggung jawab yang terus dijaga hingga seluruh tahapan pendidikan dapat diselesaikan dengan baik. Semoga segala pengalaman dan pelajaran yang diperoleh selama proses ini dapat menjadi bekal berharga untuk menghadapi kehidupan di masa mendatang. Tetaplah menjadi pribadi yang kuat, terus berkembang, serta menghargai setiap proses yang telah dilalui sebagai bagian dari perjalanan menuju masa depan yang lebih baik.



DAFTAR PUSTAKA

- Adha, L. Hadi, Zaeni Asyhadie, and Rahmawati Kusuma. 2020. "Digitalisasi Industri Dan Pengaruh Terhadap Ketenagakerjaan Dan Hubungan Kerja Di Indonesia." *Journal Kompilasi Hukum* V(2). doi: <https://doi.org/10.29303/jkh.v5i2.49>.
- Arifa, Isna, Ahmad Choiri, Wahyu Wibowo, and Panggabean Nur Azizah Aminuddin. 2025. "Peran UMKM Dalam Meningkatkan Perekonomian Nasional." *Jurnal Pendidikan, Sosial Dan Humaniora* 4(4):5376–85. doi: <https://doi.org/10.56799/peshum.v4i4.9530>.
- Bernadeta, Purwanti Rahyu Siti, Habib Khairul, and Ihsan muhammad Kamil. 2022. "Algoritma Bresenham Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Stepper Penggerak Gantry Pada Purwarupa Mesin 3D-CNC Laser Cutting." *Seminar Nasional Inovasi Vokasi (SNIV)*, EISSN 2830-0343 1(1):244–52. doi: <https://prosiding.pnj.ac.id/index.php/sniv/article/view/300>.
- Diyani, Astika Sukma, Assidqi Dani Fajar, Melisa Handayani, Naerul Edwin Kiky Aprianto, and Rafli Zakaria. 2024. "Revolusi Industri 4.0: Pengaruh Revolusi Industri Pada Kewirausahaan Demi Kemandirian Ekonomi Masyarakat Indonesia." *Jurnal Ilmiah Ekonomi Dan Manajemen* 3(1):36–48. doi: <https://doi.org/10.61722/jiem.v3i1.3388> Revolusi.
- Fahrizal, Muhammad Fikriatul Aslam, Nurhikmah Anwar, Isminarti, and Andi Fitriati. 2022. "Rancang Bangun Mesin Pemotong Styrofoam Berbasis CNC 2 Axis Menggunakan Hot Wire." *Jurnal Mekatronika Dan Penerapan Industri* 31–36. doi: <https://doi.org/10.61141/maple.v4i2.384>.
- Firmansyah, Heru. 2025. "Perancangan Dan Pembuatan Sistem Mekanik Mesin Pemotong Styrofoam Otomatis Berbasis CNC 2 . 5 a Xis Menggunakan Hot Wire." *Jurnal Program Studi Teknik Mesin*. doi: <http://repository.unpas.ac.id/81755/>.
- Ghiffari, Sultan Akmal, and Joko Aryanto. 2026. "Digital Transformation of MSME Stock Management Through the Implementation of a Real-Time Mobile E-Inventory System Transformasi Digital Manajemen Stok UMKM Melalui Implementasi Sistem E-Inventory Mobile Real-Time." 6(January):11–22. doi: <https://doi.org/10.57152/malcom.v6i1.2334>.
- Haq, Muhammad Miftahul, Nurfadilah, Risma Maulina, Muhammad Arsyad Suyuti, and Abdul Salam. 2019. "Pengembangan Desain Konstruksi Mesin CNC Hot Wire Untuk Foam." *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* X(X):1–13. doi: <http://dx.doi.org/10.31963/sinergi.v16i1.1196> Pengembangan.

- Harahap, Lokot Muda, Afifa Rahma Wudda, Andika Zulfri, and Putri Waiwini. 2025. "Implikasi Revolusi Industri 4.0 Terhadap Perubahan Struktur Ekonomi Indonesia : Sebuah Studi Literatur." *JURBISMAN: Jurnal Bisnis Dan Manajemen* 3(1):93–108. doi: <https://doi.org/10.61930/jurbisman.v3i1.1003>.
- Ilman, Abdillah Fashiha, and Ach Taufik Mustofa, AhmadAs'ad. 2021. "Rancang Bangun Mesin Pemotong Tulisan Dengan Bahan Styrofoam Berbasis CNC." *Jurnal Techno Bahari* 8(1):1–6. doi: <https://doi.org/10.52234/tb.v8i1.105>.
- Kurniawan, Eddy. Syaifurrahman, Jekky Bong. 2021. "Pengujian Tingkat Akuras Dan Error Dimensi Hasil Produk Mesin CNC Lathe Minu Custom." *Jurnal Rekayasa Mesin, Universitas Brawijaya* (November):747–56. doi: <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.03.24>.
- Maulan, Anggita Muhamad, Graha Laksyah, Dwi Saputra, and Rivaldi Bakti. 2025. "Pengaruh Sistem Otomasi Robotik Terhadap Proses Produksi Mencakup Efisiensi Biaya , Waktu , Dan Kualitas Produk Menggunakan Metode Analisi Data Statistik." *Jurnal Lentera BITEP* 03(01):8–16. doi: <https://doi.org/10.59422/global.v3i01.720>.
- Nugroho, Hafidz, and Sumariyah. 2019. "Desain Dan Implementasi Mesin Computer Numerical Control (CNC) Berbasis Arduino Sebagai Plotter Untuk Menggambar Garis Dan Bidang Sederhana." *Jurnal Berkala Fisika* 22(4). doi: https://ejournal.undip.ac.id/index.php/berkala_fisika/article/view/27255.
- Rajib, Mochammad, El Atros, Boni Sena, Fauzan Hibatullah, and Satya Permadi. 2025. "Pengaruh Parameter Mesin CNC Laser Cutting Terhadap Kualitas Hasil Pemotongan Material Sheet Metal Di PT. XYZ." *Pendidikan Teknik Mesin Undiksha* 13(2):246–52. doi: <https://doi.org/10.30588/jeemm.v9i1.2164>.
- Ratna Mustika Yasi, and Charis Fathul Hadi. 2021. "George Simon Ohm Merumuskan Hubungan Antara Kuat Aruslistrik (I), Hambatan (R) Dan Beda Potensial (V) Yang Kemudian Dikenal Dengan Hukum Ohm. Arus Didefinisikan Sebagai Banyaknya Elektron Yang Melalui Sebuah Konduktor Tiap Waktu (Atau Satu Detik),Dari Pen." *JOURNAL ZETROEM, e-ISSN Tersedia Melalui Platform Universitas PGRI Banyuwangi*. 3(1):34–36. doi: <https://doi.org/10.36526/ztr.v3i1.1331>.
- Sartika Linda, Prasetia Muis Abdul, Novtandy Tegar. 2024. "Pengaruh Kecepatan Motor DC Pada Mesin CNC Terhadap Konsumen Energi Di SMKN 2 Tarakan." *Media ElektriKA, Diterbitkan Oleh Universitas Muhammadiyah Semarang*. 17(2):121–32. doi:

<https://doi.org/10.26714/me.v17i2.15527>.

Syafiq, Nur, and Enty Nur Hayati. 2020. “Perancangan Dan Pengembangan Alat Pemotong Styrofoam Semi Otomatis Menggunakan Metode RULA Di Desa Kalisari.” *Jurnal Ilmiah Dinamika Teknik* (1):43–52. doi: <https://www.unisbank.ac.id/ojs/index.php/ft1/article/view/7766/2732>.

Yuniar Pratiwi, Annastasya, Jalan RMangun Muka Raya, Jakarta Timur, and Dki Jakarta. 2025. “Industri 4.0 Dan Kesiapan Sdm Teknik Elektronika Dalam Konteks Sdg 9: Industry, Innovation and Infrastructure.” *Jurnal Ilmu Sains Dan Teknologi* 1(2):73–82. doi: <https://artmediapub.id/index.php/JIST/article/view/262>.

