

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Pada Penelitian (Munadi et al., 2018) dengan judul merancang prototipe mesin CNC laser *engraving* dua sumbu menggunakan diode laser untuk benda kerja akrilik. Mesin dirancang dengan rangka aluminum extrusion, motor *stepper*, dan USB CNC controller. Dimensi benda kerja maksimum adalah 600 mm x 300 mm x 2 mm. Sistem gerak motor *stepper* dioptimasi pada mode 1/8 *micro stepping* untuk presisi yang lebih baik. Hasilnya, panas radiasi yang diterima benda kerja saat *engraving* adalah $558,8 \times 10^{-5}$ kal/detik, membuktikan bahwa *diode* laser mampu bekerja stabil untuk material akrilik dengan ketebalan tipis.

Pada Penelitian (Saputro & Darwis, 2020) mengembangkan mesin laser *engraver* and *cutter* berbasis Arduino dan GRBL *firmware* untuk pembuatan casing akrilik pada praktikum mahasiswa. Sistem ini menggunakan laser diode 15 watt dan skema kontrol berbasis *G-code*. Pengolahan desain dilakukan dengan *software* Inkscape dan dikonversi ke *G-code* sebelum dikirim ke mesin. Penelitian ini membuktikan bahwa sistem berbasis *open-source* dapat diimplementasikan secara efektif dalam lingkungan pendidikan maupun industri kecil. Penggunaan laser *diode* dan motor *stepper* dalam konfigurasi ini mampu menghasilkan hasil potong yang rapi, cepat, dan efisien. Temuan ini sangat relevan untuk UMKM karena peralatan dan komponennya dapat diperoleh dengan biaya rendah.

Pada Penelitian (Rosadi et al., 2019) dari Politeknik Bosowa merancang prototipe mesin CNC laser *engraving* 2-axis berbasis Arduino Uno dengan motor *stepper* NEMA 23 dan laser *diode* 2,5 watt. Mesin ini diuji untuk proses *engraving* pada kayu, tripleks, dan akrilik dengan parameter uji kecepatan 125 mm/menit, jarak fokus 58 cm, dan daya 1500 mW. Hasil uji coba menunjukkan bahwa mesin mampu menghasilkan grafir yang tajam dan rapi, terutama pada media akrilik dengan ketebalan tertentu. Penelitian ini menekankan kesesuaian teknologi ini sebagai media pembelajaran serta sebagai alat produksi mandiri bagi pelaku UMKM di bidang kerajinan. Selain presisi, kemudahan penggunaan dan biaya produksi yang rendah menjadi keunggulan utama mesin ini.

Pada Penelitian (Hadi et al., 2021) dengan judul merancang mesin CNC laser cutting dua sumbu menggunakan tabung laser CO₂ dan *software* Mach3. Penelitian ini meneliti pengaruh parameter *feedrate* terhadap akurasi potong. *Feedrate* terbaik ditemukan pada 50 mm/menit dengan akurasi 0,73 mm. Walaupun menggunakan teknologi CO₂ yang biayanya lebih tinggi dibanding laser *diode*, penelitian ini memberikan Gambaran tentang pentingnya pengaturan kecepatan gerak dan kualitas hasil potong pada material seperti akrilik.

Pada Penelitian (Budianto et al., 2020) mengusulkan mesin multifungsi berbasis Arduino yang menggabungkan kemampuan 3D printing dan laser *engraving*. Head mesin dapat diganti untuk beralih fungsi dari *printer* ke *engraver*. Laser *engraver* yang digunakan mampu bekerja optimal pada kecepatan 300–400 mm/menit. Mesin ini terbukti dapat melakukan proses *engraving* sederhana pada media tripleks dan karton. Desain yang efisien dan modular sangat sesuai untuk pelaku usaha mikro yang memerlukan fleksibilitas alat produksi dalam ruang terbatas.

Pada Penelitian (Suharto, 2020) merancang prototipe mesin CNC laser *cutting* menggunakan laser *diode* 5500 mW yang ditujukan untuk pemotongan akrilik. Mesin ini dirancang dengan dimensi kerja 500 mm × 500 mm, berbasis Arduino Uno, dan pengoperasiannya dilakukan melalui LaserGRBL. Penelitian menunjukkan bahwa mesin mampu memotong media akrilik dengan ketebalan hingga 3 mm dengan hasil potong yang rapi dan presisi. Sistem ini sangat relevan untuk mendukung produksi souvenir akrilik karena biaya pembuatannya rendah dan mudah dioperasikan oleh pelaku UMKM.

Pada Penelitian (Uno et al., 2025) melakukan analisis parameter pemesinan pada mesin CNC laser berbasis Arduino Uno terhadap media MDF dan akrilik dengan ketebalan 3 mm. Mereka menguji berbagai kombinasi (250–1000 mm/menit) dan daya laser (25%–55%). Hasil optimal diperoleh pada *feedrate* 750 mm/menit dan daya laser 40% dengan waktu proses 4 menit 42 detik. Parameter ini menghasilkan grafir logo dengan kualitas terbaik pada detail dan kontras. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa di atas 40% daya, hasil grafir menjadi terlalu gosong. Kesimpulannya, penyesuaian parameter sangat penting dalam mencapai kualitas

dan efisiensi kerja, serta menegaskan bahwa mesin berbasis Arduino + GRBL sudah sangat layak digunakan untuk akrilik UMKM secara optimal.

Berikut ini adalah perbandingan dari beberapa penelitian terdahulu yang relevan dan sesuai dengan tema *Laser Cutting* dapat dilihat pada Tabel 2. 1.

Tabel 2. 1 Tabel Perbandingan Dari Beberapa Penelitian Terdahulu

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil Utama
1	Munadi et al. (2018)	Rancang Bangun Mesin CNC Laser Engraving Dua Sumbu	Laser <i>diode</i> , motor <i>stepper</i> , <i>microstepping</i> 1/8, area kerja 600×300×2 mm	Mesin stabil untuk <i>engraving</i> akrilik, panas radiasi konstan, cocok untuk produksi ringan
2	Saputro & Darwis (2020)	Laser <i>Engraver</i> and <i>Cutter</i> untuk <i>Casing</i> Akrilik	Arduino Uno, laser <i>diode</i> 15W, <i>firmware</i> , GRBL, <i>software</i> <i>Inkscape</i>	Potongan casing akrilik rapi, waktu produksi efisien, desain <i>G-code</i> mudah
3	Rosadi et al. (2020)	CNC Laser <i>Engraving</i> 2 Axis untuk Media Kayu dan Akrilik	Arduino Uno, laser <i>diode</i> 2.5W, NEMA 23, gerak X-Y, kecepatan 125 mm/menit	Ukiran tajam dan konsisten, dapat digunakan untuk media akrilik
4	Budianto et al. (2020)	Mesin 3D <i>Printer</i> & Laser <i>Engraver</i> Berbasis Arduino	Laser <i>head modular</i> , Arduino, kecepatan optimal 300–400 mm/menit	Dapat <i>engraving</i> karton/triplek; sistem <i>hybrid</i> efisien ruang
5	Hadi et al. (2021)	CNC Laser <i>Cutting</i> CO ₂ dengan <i>Software</i> Mach3	Laser CO ₂ , motor <i>stepper</i> , <i>software</i> Mach3	<i>Feedrate</i> 50 mm/menit, hasilkan akurasi 0,73 mm; cocok untuk bentuk melingkar
6	Suharto (2022)	Prototipe Mesin CNC Laser <i>Diode</i> 5500 mW	Arduino Uno, motor <i>stepper</i> , LaserGRBL, area kerja 500×500 mm	Dapat potong akrilik 3 mm, hasil potong rapi dan presisi

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil Utama
7	Saragi et al. (2025)	Analisis Parameter CNC Laser Berbasis Arduino	Arduino Uno, laser <i>diode</i> , MDF 3 mm, variasi & daya	750 mm/menit & daya 40% hasilkan grafir optimal

2.2 Landasan Teori

Landasan teori merupakan teori-teori yang berhubungan atau berfungsi sebagai pedoman atau acuan agar peneliti tidak menyimpang dari tujuan awal yang telah ditetapkan.

2.2.1 *Computer Numerical Control (CNC) Laser Cutting & Engraver*

Computer Numerical Control (CNC) seiring dengan perkembangan zaman, ilmu pengetahuan dan teknologi juga berkembang sangat pesat, diantaranya di bidang mekanika dan elektronika. Dahulu di dunia industri, sistem kerjanya masih menggunakan tenaga manual dimana peran manusia sangat dominan, namun pada saat ini sistem tersebut telah beralih ke sistem otomatis dengan penggunaan robot. Oleh karena masyarakat di era modern ini ingin hal yang cepat dan praktis dengan kualitas bagus dalam menghasilkan sebuah produk, maka diperlukan dukungan dan ketersediaan peralatan pendukung kinerja di industri modern, antara lain mesin-mesin (CNC) *Computer Numerical Control* (Munadi et al., 2018).

Awal lahirnya mesin CNC bermula dari 1952 yang dikembangkan oleh John Pearseon dari Institut Teknologi Massachusetts. Semula proyek tersebut diperuntukkan untuk membuat benda kerja khusus yang rumit. Semula perangkat mesin CNC memerlukan biaya yang tinggi dan volume unit pengendali yang besar. Pada tahun 1973, mesin CNC masih sangat mahal sehingga masih sedikit perusahaan yang mempunyai keberanian dalam memelopori investasi dalam teknologi ini. Dari tahun 1975, produksi mesin CNC mulai berkembang pesat. Perkembangan ini dipacu oleh perkembangan mikroprosesor, sehingga volume unit pengendali dapat lebih ringkas. Penggunaan mesin CNC hampir terdapat di segala bidang. Dari bidang pendidikan dan riset, dimana telah mempergunakan alat-alat demikian sehingga dihasilkan berbagai hasil penelitian yang bermanfaat. Hal ini tidak terasa sudah banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari masyarakat banyak. Dapat dilihat pada Gambar 2. 1 (Munadi et al., 2018).



Gambar 2. 1 *Laser CNC Cutting*

Dalam industri otomotif, robotika, kapal, dan pesawat, sering kita jumpai suatu mesin yang digunakan untuk membuat suatu produk dengan cara memotong, menggores, atau mengukir sebuah material, yang dikenal dengan CNC laser *engraving*. Selain untuk industri manufaktur seperti di atas, pemanfaatan mesin CNC cutting atau *engraving* tidak selalu untuk plat, tetapi juga merambah ke dunia industri kulit. Selanjutnya, mesin CNC laser *engraving* memiliki berbagai keunggulan dibandingkan teknologi manufaktur lainnya karena dapat menerima data langsung dari komputer, sehingga otomatisasi penggoresan dapat berjalan dengan baik. Penggunaan mesin CNC pada sistem laser *engraving* sangat diperlukan, karena kita dapat memotong suatu bahan atau menggores atau mengukir bahan tersebut dengan bentuk desain sesuai dengan yang kita inginkan, dan dengan kualitas penggoresan yang bagus. Hasil laser *engraving* dengan kualitas potongan pinggirnya dipengaruhi oleh kekuatan daya laser, kekasaran permukaan benda kerja, lebar goresan, dan kecepatan perpindahan gerakan sinar laser.

G-code adalah bahasa pemrograman *printer* 2D atau 3D. Dengan menggunakan *G-code*, serangkaian instruksi yang berasal dari komputer akan dapat diterjemahkan ke dalam perintah yang dimengerti oleh peralatan cetak 3D ataupun mesin laser potong 2 dimensi. Sebagai contoh, komputer memberi tahu pada *printer* 3D, kapan, di mana, dan bagaimana cara memindahkan dan berapa banyak yang harus diekstrusi selama seluruh proses cetak objek dilakukan.

Pengetahuan tentang perintah *G-code* akan memberi kita pengetahuan yang lebih komprehensif mengenai teknik pencetakan 2D dan 3D. Orang yang mampu memecahkan masalah *printer* 3D, mereka akan lebih baik pemahamannya dalam mengontrol setiap aspek dari proses cetak dan mampu mengidentifikasi dan mencegah kegagalan cetak jauh sebelum terjadi.

G-code adalah singkatan dari “*Geometric Code*”. Fungsi utamanya adalah untuk menginstruksikan mesin dalam menggerakkan *nozzle* bagaimana cara bergerak secara geometris dalam 3 dimensi.

2.2.2 Proses pembentukan G – Code pada LaserGRBL

Proses pembentukan G – code merupakan tahapan yang menghubungkan desain yang telah dibuat dengan proses eksekusi pada mesin CNC. Pada penelitian ini, desain aksesoris terlebih dahulu dibuat menggunakan perangkat lunak Inkscape dan disimpan dalam format *Scalable Vector Graphics* (.svg). Selanjutnya, file desain tersebut diimpor ke dalam aplikasi LaserGRBL untuk dilakukan proses pengolahan sehingga dapat diterjemahkan menjadi lintasan gerak (*toolpath*) yang dapat dipahami oleh sistem kendali mesin CNC. Pada tahap ini, operator juga menentukan parameter pemotongan seperti *laser power*, *feed rate*, *pass*, ukuran objek, serta posisi awal pemotongan sesuai kebutuhan proses.

Tahap pembentukan G-code pada LaserGRBL dikenal sebagai *post processing*, yaitu proses penerjemahan data geometris hasil desain menjadi serangkaian instruksi dalam bentuk G-code. Instruksi tersebut berisi koordinat pergerakan sumbu X dan Y, kecepatan gerak, perintah menyalakan dan mematikan laser, serta parameter lain yang diperlukan selama proses pemotongan. Setiap perintah G-code disusun secara berurutan sehingga mampu menghasilkan lintasan pemotongan yang sesuai dengan bentuk desain yang telah dibuat.

G-code yang dihasilkan kemudian dikirimkan ke Arduino Uno melalui komunikasi serial USB. Selanjutnya, firmware GRBL yang tertanam pada Arduino Uno menerjemahkan setiap perintah G-code menjadi sinyal DIR yang diteruskan ke *driver* TMC2209 untuk mengendalikan motor *stepper* pada sumbu X dan Y, serta menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur daya keluaran modul laser SCULPFUN S30 Pro. Dengan demikian, proses pembentukan G-code menjadi tahapan yang sangat penting karena menentukan kesesuaian antara desain digital

dengan hasil pemotongan yang dihasilkan oleh mesin CNC mini berbasis laser.

2.2.3 Prinsip Kerja Laser CNC

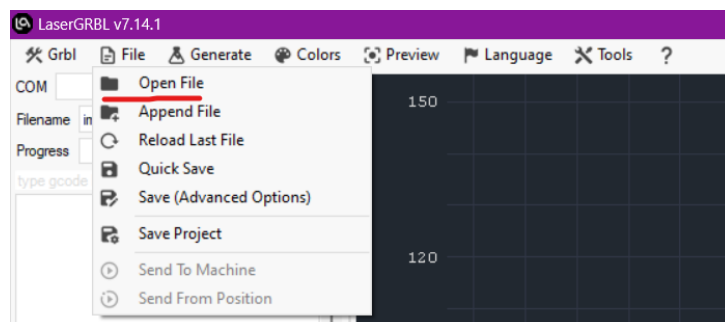
Proses kerja mesin Laser CNC diawali dengan pembuatan atau pemilihan desain yang akan dipotong pada material akrilik. Desain dapat dibuat menggunakan perangkat lunak berbasis vector seperti LaserGRBL dalam format file PNG atau JPG.

Apabila desain berupa gambar raster (JPG/PNG), maka gambar tersebut harus dikonversi terlebih dahulu menjadi bentuk yang dapat diproses sebagai jalur pemotongan (*vector path*) atau diolah menggunakan metode *engraving* atau *cutting*.

Tahapan sebelum konversi menjadi *G-code* adalah sebagai berikut:

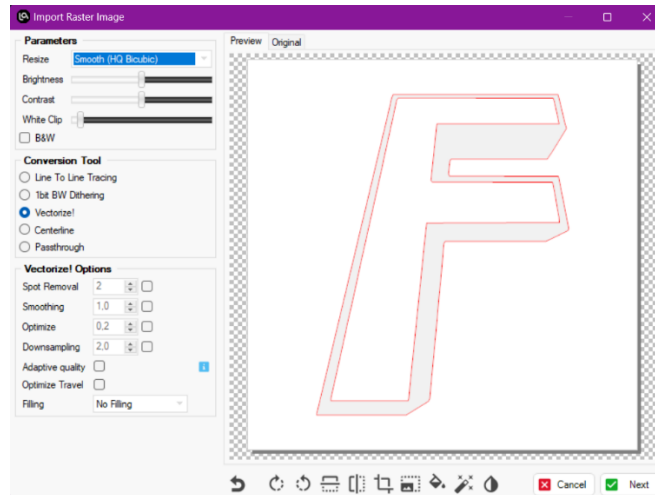
1. *Import* Gambar ke *software* LaserGRBL

Setelah desain selesai dibuat atau jika file berupa format JPG atau PNG, maka LaserGRBL akan menampilkan jendela pengaturan konversi gambar yang berisi beberapa parameter penting sebelum dikonversi menjadi *G-code*. Untuk memasukkan file klik ***Open File***.



Gambar 2. 2 Klik menu *Open File*

2. Pengaturan Mode Pemrosesan (*Toolpath Setting*)



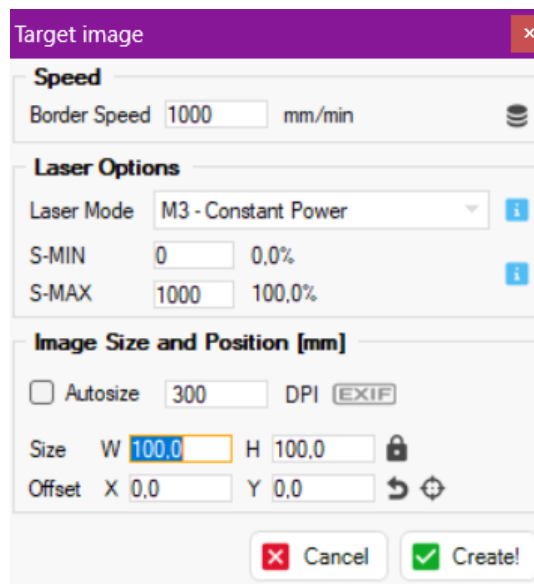
Gambar 2. 3 *Import Raster Image Setting*

Sebelum proses konversi menjadi *G-code*, pengguna harus mengatur parameter *toolpath* (jalur gerak laser). Beberapa pengaturan utama yang dilakukan di LaserGRBL antara lain:

- a. Bagian *Parameters* digunakan untuk menyesuaikan karakteristik citra raster sebelum dikonversi menjadi jalur vektor. Opsi *Resize (Smooth HQ Bicubic)* berfungsi menghaluskan gambar saat dilakukan perubahan ukuran agar detail tepi tetap terjaga. Pengaturan *Brightness* dan *Contrast* digunakan untuk menyesuaikan tingkat kecerahan dan perbedaan intensitas terang–gelap sehingga batas objek lebih jelas terbaca sistem. Parameter *White Clip* menentukan ambang batas warna putih yang dianggap sebagai latar belakang, sedangkan opsi *B&W (Black and White)* mengubah gambar menjadi citra hitam-putih guna mempermudah proses identifikasi objek sebelum dilakukan
- b. Menu *Conversion Tool* berfungsi menentukan metode konversi gambar menjadi jalur gerak laser. Opsi yang tersedia meliputi *Line To Line Tracing*, *1bit BW Dithering*, *Vectorize!*, *Centerline*, dan *Passthrough*. Pada proses pemotongan akrilik berbasis outline, umumnya dipilih metode *Vectorize!* karena metode ini mengubah gambar raster menjadi garis vektor yang akan diikuti oleh laser sebagai jalur pemotongan.
- c. Bagian *Vectorize! Options* digunakan untuk mengatur kualitas dan efisiensi jalur vektor yang dihasilkan. Parameter seperti *Spot Removal* menghapus noise atau objek kecil yang tidak diperlukan, *Smoothing* menghaluskan garis

hasil konversi, *Optimize* menyederhanakan jumlah titik koordinat, dan *Downsampling* mengurangi kompleksitas jalur. Opsi *Adaptive Quality* menyesuaikan detail berdasarkan kompleksitas gambar, sedangkan *Optimize Travel* mengatur urutan jalur agar pergerakan tanpa pemotongan lebih efisien. Menu *Filling* menentukan apakah area tertutup hanya dipotong pada *outline* atau diisi, dimana pada pemotongan akrilik biasanya digunakan opsi *No Filling*.

3. Selanjutnya Klik “*Next*” pada menu tersebut untuk melanjutkan Settingan kecepatan gerak laser, mode dan intensitas laser, serta ukuran dan posisi gambar pada Area Kerja.

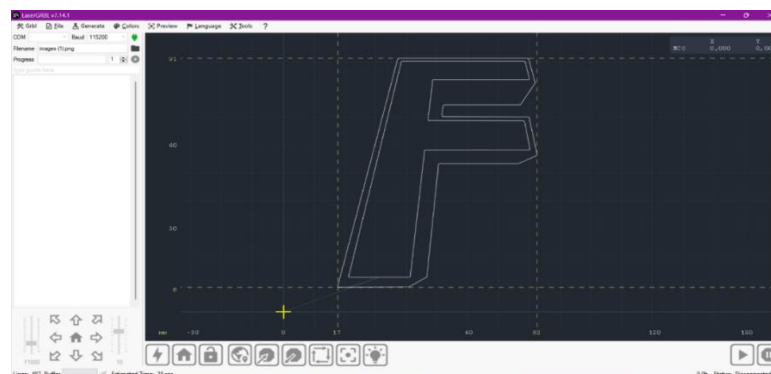


Gambar 2. 4 *Target Image*

Beberapa pengaturan utama yang dilakukan pada pengaturan *Target Image* antara lain:

- a. Pada bagian *Speed*, parameter *Border Speed* digunakan untuk mengatur kecepatan gerak laser saat melakukan pergerakan batas atau lintasan tanpa proses pemotongan utama. Nilai ini dinyatakan dalam satuan mm/menit. Pengaturan kecepatan yang tepat berpengaruh terhadap stabilitas gerakan mesin, dimana kecepatan terlalu tinggi dapat menyebabkan getaran atau kehilangan langkah, sedangkan kecepatan terlalu rendah dapat memperpanjang waktu pengerjaan.

- b. Bagian *Laser Option* berfungsi mengatur mode kerja dan intensitas daya laser. Opsi *Laser Mode* seperti *M3 – Constant Power* menunjukkan bahwa laser bekerja dengan daya konstan selama proses pemotongan. Mode ini umum digunakan untuk *cutting* karena memberikan energi panas yang stabil. Parameter *S-MIN* dan *S-MAX* menentukan rentang nilai PWM (*Pulse Width Modulation*) yang mengontrol daya keluaran laser. Nilai *S-MAX* biasanya disesuaikan dengan konfigurasi GRBL (misalnya 1000), dimana semakin tinggi nilai PWM maka semakin besar daya yang dihasilkan untuk proses pemotongan.
 - c. Bagian *Image Size and Position* digunakan untuk mengatur dimensi dan posisi desain pada area kerja mesin dalam satuan milimeter. Opsi *Autosize* menyesuaikan ukuran berdasarkan resolusi DPI, sedangkan pengaturan *Width (W)* dan *Height (H)* menentukan ukuran akhir objek yang akan dipotong. Ikon kunci digunakan untuk menjaga rasio proporsi agar tidak berubah saat salah satu dimensi diubah. Parameter *Offset X* dan *Y* mengatur posisi awal desain terhadap titik nol mesin, sehingga memungkinkan penempatan objek secara presisi pada material akrilik sebelum proses eksekusi dimulai.
4. Setelah Tombol “*Create*” ditekan, *software* LaserGRBL akan menghasilkan file *G-code* berdasarkan seluruh parameter yang telah dikonfigurasi. *G-code* tersebut ditampilkan dalam bentuk *preview* jalur pemotongan dan belum langsung dijalankan oleh mesin. Proses pemotongan baru dimulai setelah pengguna menekan tombol eksekusi, dimana *G-code* dikirim secara *real-time* ke Arduino untuk diproses oleh firmware GRBL.

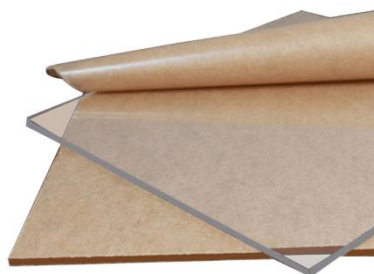


Gambar 2. 5 Desain Pemotongan yang dihasilkan

2.2.4 Jenis – Jenis Akrilik

Akrilik merupakan material termoplastik yang umumnya berbahan dasar *polymethyl methacrylate* (PMMA). Material ini memiliki sifat ringan, kaku, mudah dibentuk, dan dapat digunakan sebagai alternatif kaca. Ketika digunakan pada proses pemotongan atau pengukiran menggunakan laser *diode*, akrilik akan berinteraksi dengan energi cahaya laser melalui proses refleksi, transmisi, hamburan, dan absorpsi. Energi laser yang diserap oleh material akan berubah menjadi panas, sehingga dapat menyebabkan pelelehan, penguapan, perubahan warna, atau kerusakan pada permukaan akrilik.

Laser *diode* menghasilkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu. Pada penelitian (Kasim et al. 2026), modul laser yang digunakan memiliki panjang gelombang 450 nm atau berada pada spektrum cahaya biru, dengan daya maksimum 80 W. Laser tersebut digunakan untuk menguji kemampuan pemotongan material PMMA atau akrilik dengan variasi warna dan ketebalan. Warna akrilik memengaruhi jumlah energi laser yang dapat diserap oleh material. Akrilik bening memiliki kemampuan meneruskan cahaya yang tinggi karena kandungan pigmen penyerapnya rendah. Akibatnya, sebagian besar energi laser dapat melewati material dan hanya sebagian kecil yang diubah menjadi panas. Kondisi ini menyebabkan akrilik bening lebih sulit dipotong menggunakan laser *diode*. (Bodmer et al. 2014) menjelaskan bahwa akrilik memiliki transmisi cahaya yang baik pada panjang gelombang tertentu, terutama di atas 550 nm, sedangkan transmisi dapat menurun pada panjang gelombang yang lebih pendek. Akrilik Bening dapat dilihat pada Gambar 2. 6 (Bodmer et al. 2014)



Gambar 2. 6 Akrilik Bening

Hasil penelitian (Kasim et al. 2026) menunjukkan bahwa akrilik bening

merupakan material yang paling sulit dipotong menggunakan laser diode 450 nm. Pada akrilik bening dengan ketebalan 2 mm, pemotongan memerlukan dua hingga tiga lintasan. Pada ketebalan 3 mm, pemotongan baru berhasil pada lintasan ketiga, sedangkan akrilik dengan ketebalan 5 mm tidak berhasil dipotong meskipun telah diberikan tiga lintasan. Hal tersebut menunjukkan bahwa akrilik bening memiliki tingkat penyerapan energi laser yang lebih rendah dibandingkan akrilik berwarna. Akrilik Hitam dapat dilihat pada Gambar 2. 7 (Kasim et al. 2026)



Gambar 2. 7 Akrilik Hitam

Berbeda dengan akrilik bening, akrilik hitam memiliki pigmen berwarna gelap yang mampu menyerap energi laser lebih besar. Energi laser yang diserap oleh pigmen tersebut akan dikonversi menjadi panas pada permukaan akrilik. Panas yang terbentuk menyebabkan peningkatan temperatur lokal sehingga proses pelelehan dan penguapan material dapat berlangsung lebih cepat. Oleh karena itu, akrilik hitam cenderung lebih mudah dipotong atau diukir menggunakan laser *diode*.

Melaporkan bahwa akrilik hitam menunjukkan kemampuan pemotongan paling baik dibandingkan akrilik bening dan biru. Pada ketebalan 2 mm dan 3 mm, akrilik hitam dapat ditembus hanya dengan satu lintasan, sedangkan pada ketebalan 5 mm diperlukan sekitar dua sampai tiga lintasan. Peneliti menyimpulkan bahwa warna hitam memiliki absorpsi cahaya yang tinggi sehingga sebagian besar energi laser diserap dan diubah menjadi panas. Dapat dilihat pada Gambar 2. 8 (Kasim et al. 2026)



Gambar 2. 8 Akrilik Putih

Akrilik putih memiliki karakteristik optik yang berbeda dari akrilik bening dan hitam. Pigmen putih pada akrilik dapat memantulkan dan menghamburkan cahaya laser. Akibatnya, sebagian energi laser tidak masuk ke dalam material dan tidak seluruhnya diubah menjadi panas. Kondisi tersebut menyebabkan akrilik putih memerlukan pengaturan daya, kecepatan pemotongan, dan jumlah lintasan yang berbeda dibandingkan akrilik hitam (Kasim et al., 2026).

Penelitian (Pandey & Doloi 2025) mengenai laser marking pada PMMA juga menunjukkan bahwa material berwarna hitam dan putih memberikan respons berbeda terhadap laser. PMMA hitam cenderung menyerap energi laser lebih besar, sedangkan PMMA putih cenderung memantulkan lebih banyak energi. Perbedaan tersebut memengaruhi kualitas tanda laser, kedalaman marking, lebar area terbakar, serta perubahan permukaan material.

Berdasarkan uraian tersebut, akrilik bening, hitam, dan putih mempunyai respons yang berbeda terhadap laser diode. Akrilik bening cenderung meneruskan energi laser sehingga paling sulit dipotong. Akrilik hitam cenderung menyerap energi laser paling besar sehingga lebih mudah mengalami pemanasan dan pemotongan. Sementara itu, akrilik putih cenderung memantulkan dan menghamburkan sebagian energi laser sehingga memerlukan pengaturan parameter yang sesuai. Dengan daya, kecepatan, panjang gelombang, fokus, dan ketebalan yang sama, perbedaan warna akrilik akan memengaruhi jumlah lintasan, lebar kerf, kualitas tepi potongan, dan keberhasilan pemotongan.

2.2.5 Arduino CNC *Shield* V3

Arduino CNC *Shield* adalah papan ekspansi (*expansion board*) yang dirancang khusus untuk digunakan bersama Arduino Uno, dengan tujuan mempermudah kendali mesin CNC (*Computer Numerical Control*), seperti mesin

laser *cutter*, *router*, atau 3D *printer* berbasis *stepper* motor.

Keunggulan Arduino CNC *Shield* V3 terletak pada kemudahan instalasi dan fleksibilitasnya dalam pengembangan mesin CNC skala kecil hingga menengah. Dengan dukungan komunikasi USB melalui Arduino, sistem dapat menerima perintah *G-code* dari komputer menggunakan *software* seperti Universal *G-code* Sender atau LaserGRBL. Selain itu, shield ini telah menyediakan jalur untuk pengaturan microstepping dan kontrol arus melalui modul *driver*, sehingga memungkinkan pengaturan resolusi langkah motor yang lebih presisi. Oleh karena itu, Arduino CNC *Shield* V3 banyak digunakan dalam proyek rancang bangun mesin CNC DIY, laser engraver, maupun sistem otomasi berbasis *open-source* karena biaya yang relatif rendah dan kemudahan integrasinya.

CNC *Shield* menyediakan antarmuka langsung untuk:

- Mengontrol *stepper* motor menggunakan *driver* seperti A4988, DRV8825, atau TMC2208
- Menghubungkan limit switch pada setiap sumbu (X+, X-, Y+, Y-)
- Mengendalikan *spindle* atau laser (melalui pin PWM/*spindle enable*).
- Mengatur *step resolution* dengan *jumper microstepping*.
- Memberi *power* eksternal ke motor *driver* (biasanya 12–36 VDC).



Gambar 2. 9 Arduino Shield V3

2.2.6 Laser SCULPFUN S30 Pro

Laser SCULPFUN S30 Pro merupakan komponen utama dalam mesin pemotong berbasis CNC mini. Laser ini memancarkan cahaya dengan intensitas tinggi pada panjang gelombang 450 nm (jenis biru), dan dirancang secara khusus untuk proses *cutting* maupun *engraving* berbagai material seperti akrilik, kayu,

MDF, kulit, hingga logam tipis seperti *stainless steel* teroksidasi.

Laser hanyalah salah satu jenis perangkat atau teknologi yang dapat menghasilkan sinar laser. Jenis lainnya yang dapat menghasilkan sinar laser di antaranya adalah *Solid State Laser*, Gas Gas, *Chemical Laser* dan *Dye Laser*. Pada dasarnya, laser diode hampir sama dengan lampu LED yaitu dapat mengkonversi energi listrik menjadi energi cahaya, namun laser diode dapat menghasilkan sinar cahaya atau beam dengan intensitas yang lebih tinggi. Berdasarkan cara kerjanya, laser *diode* dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu *Injection Laser Diode* (ILD) dan *Optically Pumped Semiconductor Laser*. Laser SCULPFUN S30 Pro dapat dilihat Gambar 2. 10 (Rosadi et al., 2019)



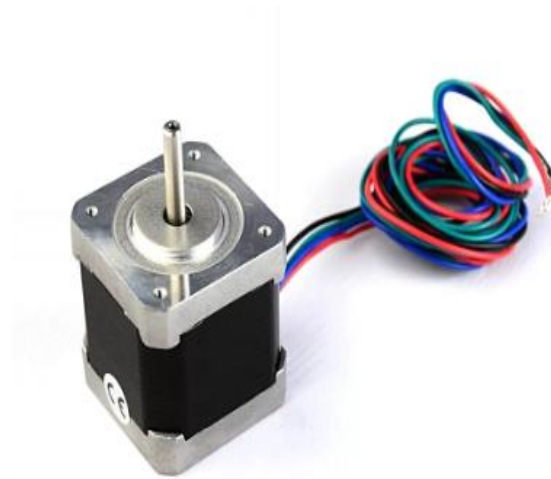
Gambar 2. 10 *Laser SCULPFUN S30 Pro*

2.2.7 *Motor Stepper Nema 17*

Motor *stepper* atau kadang disebut motor step merupakan jenis motor yang menyerupai motor servo karena posisi rotor bisa ditentukan, tetapi menggunakan pendekatan yang berbeda. Motor *stepper* bergerak berdasarkan urutan pulsa yang diberikan. Maka untuk menggerakkan motor *stepper* diperlukan pengendali motor *stepper* yang membangkitkan pulsa pulsa periodik (Pramuji et al., 2023).

Karakteristik motor *stepper* NEMA 17 adalah bahwa ia memiliki 4 fase, perbedaan fase setiap fase adalah 90 derajat, dan satu langkah adalah eksitasi dari satu fase. Setiap motor *stepper* dapat menghasilkan gerakan loncatan yang tepat, yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kontrol gerakan yang tepat. Dalam kontrol peralatan mekanis, motor *stepper* NEMA 17 dapat dengan tepat mengontrol kecepatan dan arah gerakan motor dengan mengendalikan arus.

Motor *stepper* mempunyai fungsi sebagai aktuator atau motor penggerak untuk sumbu X, Y, dan Z pada mesin CNC, penentuan atau pemakaian motor *stiper* didasari terhadap beban yang ditanggung oleh motor *stepper* tersebut, dimana motor *stiper* menggerakkan sumbu X,Y dan Z, sehingga motor *stiper* tersebut dapat dikembalikan dengan cukup mudah dan memiliki tingkat ketelitian yang cukup tinggi (Hadi et al., 2021). Gambar dari Motor *Stepper* Nema 17 dapat dilihat pada Gambar 2. 11 (Pramuji et al., 2023)..

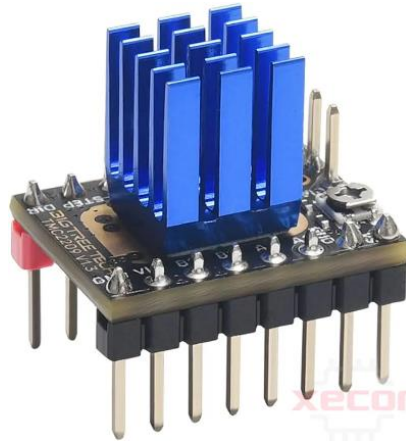


Gambar 2. 11 Motor *Stepper* NEMA 17

2.2.8 Motor *Driver* TMC2209

TMC2209 merupakan salah satu varian motor *driver stepper* terkini yang dikembangkan oleh *Trinamic Motion Control GmbH*, sebuah perusahaan asal Jerman yang terkenal dalam industri kontrol motor presisi tinggi. Motor *driver* ini dirancang secara khusus untuk mengendalikan motor *stepper* bipolar, seperti NEMA 17, dengan menawarkan sejumlah keunggulan teknologi dibandingkan dengan motor *driver* konvensional seperti A4988 maupun DRV8825.

Secara umum TMC2209 berfungsi sebagai penguat sinyal dan pengatur arus dari mikrokontroler (misalnya Arduino Uno) ke motor *stepper*. Mikrokontroler tidak mampu menyediakan arus besar secara langsung ke motor, sehingga diperlukan motor *driver* sebagai penghubung yang dapat mengatur intensitas arus serta arah dan langkah motor dengan akurat. Motor Driver TMC2209 dapat dilihat pada Gambar 2. 12 (Pandey & Doloi 2025)



Gambar 2. 12 Motor *Driver* TMC2209