

Evaluasi Kinerja Mesin CNC Laser Termodifikasi pada Proses Pemotongan Akrilik Presisi

Bukhari Kasim^{*1}, Azwar², Mahmud³, Muhammad Razi⁴, Nurdan⁵, Amalia Harmin⁶

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe; Lhokseumawe, Indonesia

⁵Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe; Lhokseumawe, Indonesia

⁶Jurusan Teknik Mesin Universitas Samudra; Langsa, Indonesia

e-mail: ^{*1} bukhari@pnl.ac.id, ² azwar@pnl.ac.id, ³ mahmud@pnl.ac.id, ⁴ razi.pnl@pnl.ac.id,

⁵ nurdan@pnl.ac.id, ⁶ amaliaharmin@unsam.ac.id

Abstrak

Inovasi teknologi Computer Numerical Control (CNC) telah menjadi pilar utama dalam industri manufaktur karena kemampuannya menghasilkan produk berpresisi tinggi dengan efisiensi waktu dan biaya yang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk memodifikasi dan menguji performa mesin CNC Laser, khususnya dalam proses pemotongan material Polimetil Metakrilat (PMMA) atau akrilik, untuk mengidentifikasi kondisi parameter kerja yang paling efektif. Pemilihan material akrilik didasari oleh penggunaannya yang luas di berbagai sektor industri dan kebutuhan akan kualitas hasil potong yang maksimal. Metode penelitian melibatkan dua seri pengujian utama: analisis Lebar Kerf dan analisis Jumlah Pass (lintasan tembus). Pengujian Lebar Kerf dilakukan dengan memvariasikan Jarak Fokus laser (5mm, 10mm, 20mm) serta kombinasi Power dan Feeding. Sementara itu, pengujian Jumlah Pass dilakukan pada kondisi power 100% dan feeding 25mm/menit dengan memvariasikan tebal (2mm, 3mm, 5mm) dan warna akrilik (bening, biru, hitam). Hasil penelitian menunjukkan bahwa jarak fokus adalah parameter dominan yang menentukan rentang lebar kerf, dengan 5mm menghasilkan kerf tersempit (0.08mm–0.18mm). Semakin besar Jarak Fokus, semakin besar pula kerf yang terbentuk. Dalam hal efisiensi pemotongan, jumlah pass berbanding lurus dengan ketebalan material. Menariknya, akrilik bening adalah yang paling sulit dipotong (memerlukan pass terbanyak, hingga 4 pass pada 5mm), menunjukkan penyerapan energi laser yang paling rendah pada kondisi yang diuji. Sebaliknya, akrilik berwarna (hitam dan biru) menunjukkan efisiensi lebih tinggi. Data ini penting sebagai dasar optimasi kinerja mesin CNC Laser untuk menghasilkan produk akrilik yang akurat dan efisien.

Kata kunci— Laser CNC, Lebar Kerf, Jumlah Lintasan, Daya, Pengumpanan

Abstract

Computer Numerical Control (CNC) technology innovation has become a core pillar in the manufacturing industry due to its ability to produce high-precision products with optimal time and cost efficiency. This research aims to modify and test the performance of a CNC laser machine, specifically in the cutting process of Polymethyl Methacrylate (PMMA) or acrylic material, to identify the most effective working parameter conditions. The selection of acrylic material is based on its widespread use across various industrial sectors and the need for maximum cutting quality. The research methodology involved two main test series: kerf width analysis and number of passes (through-cutting) analysis. The kerf width testing was conducted by varying the laser focal distance (5mm, 10mm, 20mm) and the combination of power and feeding speed. Meanwhile, the number of passes testing was performed under constant conditions of 100% power and 25mm/menit feeding, while varying the acrylic thickness (2mm,

3mm, 5mm) and acrylic color (clear, blue, black). The results show that focal distance is the dominant parameter determining the kerf width range, with 5mm producing the narrowest kerf (0.08mm–0.18mm). As the focal distance increases, the resulting kerf also widens. In terms of cutting efficiency, the Number of passes is directly proportional to material thickness. Intriguingly, clear acrylic was the most difficult to cut (requiring the highest number of passes, up to 4 passes for 5mm), indicating the lowest laser energy absorption under the tested conditions. Conversely, colored acrylic (Black and Blue) showed higher efficiency. This data is essential as a basis for optimizing the performance of CNC Laser machines to produce accurate and efficient acrylic products.

Keywords— CNC Laser, Kerf Width, Number of Passes, Power, Feeding

1. PENDAHULUAN

Berkembangnya teknologi otomasi berbasis komputer pada mesin perkakas telah mendorong terciptanya perangkat yang mampu menyelesaikan berbagai pekerjaan kompleks dengan tingkat efisiensi waktu yang lebih tinggi[1]. Pemanfaatan mesin perkakas, khususnya dalam proses pembubutan dan frais/milling, telah memungkinkan dihasilkannya produk dengan akurasi dan presisi yang tinggi [2],[3]. Inovasi tersebut kemudian berlanjut dengan hadirnya mesin *Computer Numerical Control (CNC)*, yang merupakan penyempurnaan dari mesin perkakas konvensional yang dinilai kurang efektif dari sisi waktu maupun biaya. Secara fundamental, mesin CNC beroperasi sebagai sistem otomasi yang dikendalikan komputer melalui bahasa numerik, sehingga dapat menghasilkan gerakan sesuai dengan pola desain pada mekanisme sumbu X, Y, dan Z. Dalam konteks pengerjaan grafir PCB, mesin CNC umumnya terdiri atas komponen utama berupa rangka serta sistem panel kontrol pada ketiga sumbu tersebut. Dengan demikian, konsep CNC yang dikembangkan dalam penelitian ini merupakan tindak lanjut dari hasil studi lapangan, yang diarahkan untuk meningkatkan kemudahan penerapan sekaligus memperluas potensi pemanfaatannya di bidang manufaktur.

Inovasi teknologi *Computer Numerical Control (CNC)* telah memberikan kemampuan bagi industri manufaktur untuk memproduksi objek dengan bentuk yang kompleks secara lebih mudah dan efisien. Teknologi ini banyak dimanfaatkan oleh perusahaan, baik untuk mendukung produksi massal maupun dalam pembuatan suku cadang khusus pada sektor tertentu [4]. Meskipun pengoperasiannya relatif sederhana, mesin CNC memiliki kemampuan menghasilkan produk dalam skala besar sekaligus memproduksi berbagai komponen secara massal. Selain itu, pengerjaan dengan tingkat kerumitan dan detail yang tinggi dapat dilakukan secara otomatis, sehingga memungkinkan tercapainya konsistensi kualitas produk dalam jumlah banyak dengan tingkat keseragaman yang presisi. Dengan demikian, keberadaan mesin CNC saat ini menjadi salah satu pilar penting dalam pengembangan sistem produksi modern yang menuntut efisiensi, akurasi, serta fleksibilitas.

Saat ini, mesin *Computer Numerical Control (CNC)* memegang peran krusial dalam perkembangan teknologi pemesinan modern[5]. Mesin perkakas konvensional yang sangat bergantung pada keterampilan operator diprediksi akan semakin ditinggalkan, mengingat keterbatasannya dalam menjaga konsistensi dimensi produk[6]. Variasi dimensi yang sulit dikendalikan pada proses konvensional seringkali berpotensi menimbulkan kesalahan dalam pembuatan produk. Sebaliknya, mesin CNC mampu meminimalkan bahkan menghilangkan variasi dimensi, sehingga kemungkinan terjadinya produk cacat dapat ditekan secara signifikan[7]. Konsep sistem produksi tanpa cacat (*zero defect*) hanya dapat diwujudkan apabila seluruh fungsi mesin dapat dikendalikan secara teliti (*accurate*) dan tepat (*precise*). Kondisi

tersebut hanya memungkinkan melalui penerapan sistem kendali berbasis komputer, sebagaimana yang diimplementasikan pada mesin-mesin CNC [8],[9].

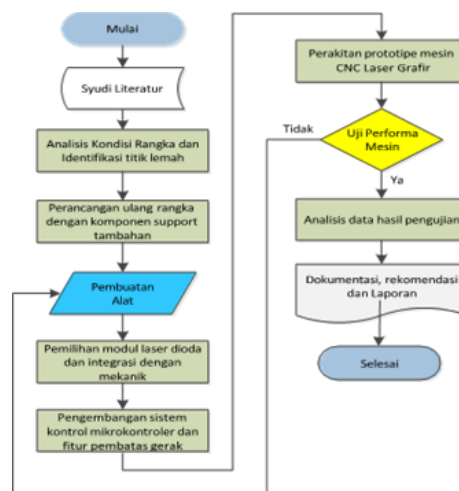
Pada beberapa jenis komponen, tingkat kehalusan permukaan yang tinggi merupakan kebutuhan utama untuk mencegah terjadinya gesekan antar bagian[10]. Hal ini khususnya berlaku pada komponen mekanik elemen mesin, di mana kualitas kehalusan permukaan berperan penting dalam mengurangi friksi antar komponen. Tingkat gesekan yang rendah tidak hanya mendukung kelancaran gerak, tetapi juga berimplikasi langsung terhadap peningkatan kinerja serta umur pakai mesin secara keseluruhan [11].

Perkembangan teknologi manufaktur modern menuntut adanya peralatan pemesinan yang mampu bekerja dengan tingkat presisi tinggi, efisiensi waktu, dan fleksibilitas terhadap berbagai jenis material[12]. Namun, mesin CNC komersial yang tersedia di pasaran umumnya memiliki biaya investasi yang relatif tinggi sehingga sulit dijangkau oleh industri kecil dan menengah, khususnya dalam konteks pemotongan material non-logam. Di sisi lain, pemanfaatan mesin CNC berbasis firmware open-source, seperti *GRBL*, meskipun menawarkan biaya yang lebih rendah dan fleksibilitas tinggi, masih menghadapi keterbatasan dari segi rancangan, optimasi, serta penerapan spesifik untuk aplikasi laser cutting[13]. Kondisi ini menimbulkan kesenjangan antara kebutuhan industri terhadap mesin pemotong presisi yang terjangkau dengan ketersediaan teknologi yang sesuai. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang berfokus pada rancang bangun mesin CNC laser cutting untuk material non-logam sebagai solusi alternatif yang ekonomis, efisien, serta relevan dengan kebutuhan produksi pada skala kecil hingga menengah.

Sejalan dengan perkembangan tersebut, penelitian ini berfokus pada rancang bangun mesin CNC laser cutting untuk produksi bahan non-logam. Pemilihan teknologi laser *cutting* sebagai basis penelitian didasarkan pada kemampuannya menghasilkan pemotongan yang presisi, cepat, dan bersih pada berbagai jenis material non-metal[13]. Rancang bangun ini diharapkan tidak hanya dapat meningkatkan efektivitas proses produksi, tetapi juga menjadi solusi alternatif yang lebih ekonomis bagi industri kecil maupun menengah yang membutuhkan peralatan manufaktur dengan tingkat akurasi tinggi dan kemudahan dalam pengoperasiannya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini akan dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang melibatkan eksperimen, pengujian, serta analisis data. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif dan kualitatif. Penelitian ini dilaksanakan dengan tahapan-tahapan seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian

Pengujian kinerja mesin CNC laser cutting dilakukan untuk mengetahui sejauh mana parameter proses berpengaruh terhadap kualitas hasil potong pada material akrilik. Dalam eksperimen ini, dilakukan pengujian terhadap berbagai jenis akrilik dengan ketebalan maksimum 5 mm menggunakan variasi daya laser dan kecepatan potong. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh jenis akrilik, daya laser, dan kecepatan potong terhadap kualitas pemotongan, yang dinilai dari lebar *kerf*, kualitas tepi potongan, dan kemampuan tembus potong[14].

Tiga variabel bebas digunakan dalam penelitian ini. Pertama adalah ketebalan akrilik, yaitu 2mm, 3mm, dan 5mm. Jenis akrilik yang digunakan adalah akrilik berwarna hitam. Variabel bebas kedua adalah daya laser, yang diatur dalam persentase dari total output (yaitu 60%, 80%, dan 100%). Variabel ketiga adalah kecepatan potong, yang ditentukan dalam satuan mm/menit (yaitu 60mm/menit, 70 mm/menit, dan 80 mm/menit). Kombinasi dari ketiga variabel bebas ini akan membentuk berbagai kondisi eksperimen yang dianalisis dalam studi ini.

Dalam penelitian ini diamati dua variabel terikat. Variabel pertama adalah kemampuan tembus pemotongan, yaitu apakah laser berhasil memotong material hingga tuntas atau tidak, yang dinilai secara kualitatif (ya/tidak). Variabel terikat kedua adalah lebar *kerf*, yaitu ukuran celah potongan yang dihasilkan oleh laser. *Kerf* menjadi indikator penting karena menunjukkan tingkat kepresisian hasil pemotongan. Kedua variabel ini menjadi dasar evaluasi dalam menilai performa mesin CNC laser cutting terhadap berbagai parameter pemotongan. Rancangan pengujian diperlihatkan pada tabel 1.

Tabel 1. Rancangan pengujian

Parameter Pemotongan	Level Parameter		
	1	2	3
Tebal akrilik	2mm	3mm	5mm
Warna akrilik	Bening	Biru	Hitam
Jarak fokus laser	5mm	10mm	20mm
Daya laser (%)	60%	80%	100%
Kecepatan potong (mm/menit)	60mm/menit	70mm/menit	80mm/menit

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kontruksi Alat

Kontruksi mesin CNC grafir yang dibuat memiliki dimensi 574mm x 630mm x 473mm dengan area kerja 400mm x 240mm x 80mm seperti diperlihatkan pada Gambar 2.



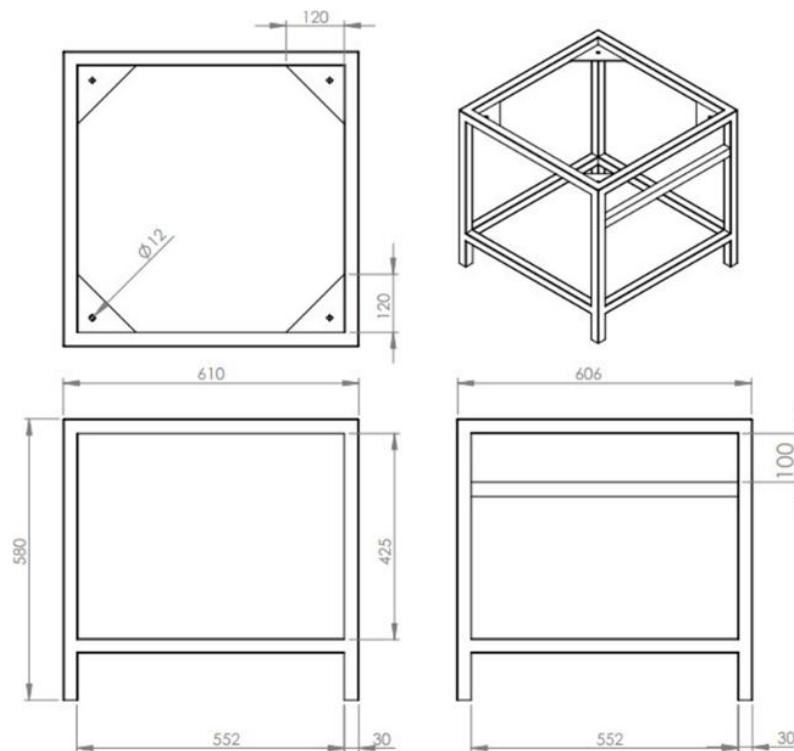
Gambar 2. Produk Mesin CNC Laser Cutting

3.2 Struktur Rangka

Rangka mesin CNC laser cutting memiliki desain konstruksi berbentuk kubus dengan dimensi panjang 610mm, lebar 610mm dengan tinggi 580mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Rangka ini dirancang untuk memberikan kestabilan dan kekakuan selama proses pemotongan laser berlangsung serta selama proses pemindahan mesin. Keempat sudut bagian atas rangka memiliki dudukan dengan lubang berdiameter 12 mm yang digunakan untuk pemasangan mesin CNC laser kebagian rangka.

Struktur rangka dilengkapi dengan penyangga horizontal pada bagian bawah dan tengah, memberikan dukungan tambahan serta menjaga keseimbangan. Bagian tengah rangka memiliki elemen horizontal tambahan setinggi 100mm dari atas yang berfungsi sebagai penopang atau tempat pemasangan sistem elektronik mesin. Jarak antar kaki rangka pada sisi dalam adalah 552mm, sementara bagian bawah memiliki ruang bebas setinggi 425mm dari tanah ke bawah penopang tengah.

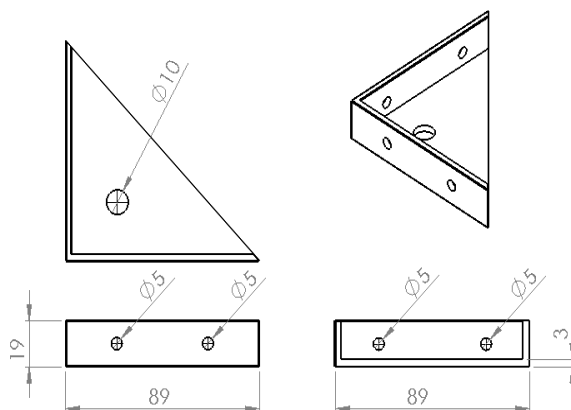
Rangka mesin ini dibuat menggunakan material besi hollow dengan ukuran 30x30mm dan ketebalan 2mm, yang dikenal memiliki kekuatan dan daya tahan yang baik terhadap beban dan getaran. Setiap sambungan antar batang besi hollow dirakit menggunakan metode pengelasan, yang memberikan ikatan struktural yang kuat dan permanen. Proses pengelasan ini memastikan bahwa seluruh rangka bersifat kaku dan tidak mudah berubah bentuk saat mesin beroperasi, terutama saat menghadapi gaya dinamis dari gerakan kepala laser. Dengan menggunakan besi hollow dan teknik pengelasan, konstruksi rangka menjadi lebih tahan lama dan mampu menjaga presisi tinggi dalam jangka waktu pemakaian yang panjang.



Gambar 3. Gambar struktur rangka mesin CNC Laser Cutting

Untuk menguatkan struktur rangka penyangga meja mesin, dipasang empat buah braket sudut. Braket sudut pada bagian rangka mesin CNC laser cutting ini berfungsi sebagai elemen struktural penguat yang sangat penting untuk menjaga kestabilan dan kekakuan rangka. Braket sudut dipasang pada empat sisi sudut mesin dengan menggunakan baut dan mur, untuk

memastikan setiap sudut memiliki tumpuan yang kokoh dan tidak mudah bergeser akibat getaran atau pada saat pemindahan mesin seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Dengan adanya braket ini, rangka mesin menjadi lebih rigid, mengurangi kemungkinan distorsi atau pergeseran presisi selama pengoperasian, serta memperpanjang usia pakai mesin secara keseluruhan.



Gambar 4. Gambar braket penguat sudut mesin

Guna meningkatkan mobilitas, pada bagian bawah rangka dipasang empat buah roda yang memungkinkan mesin CNC laser cutting dipindahkan dengan mudah dari satu tempat ke tempat lain. Roda yang digunakan dilengkapi dengan sistem pengunci (*brake*) agar mesin tetap stabil dan tidak bergerak saat digunakan. Penambahan roda ini tidak hanya mempermudah proses pemindahan, tetapi juga membantu dalam perawatan dan pengaturan posisi mesin secara ergonomis.

Pemasangan empat buah roda pada bagian bawah rangka juga bertujuan untuk mendukung mobilitas mesin CNC laser cutting yang sering digunakan dalam kegiatan pembelajaran mahasiswa jurusan Teknik Mesin. Karena mesin ini kerap dipindahkan dari satu ruang kelas ke ruang kelas lainnya, roda menjadi elemen penting agar proses pemindahan dapat dilakukan dengan cepat dan aman tanpa memerlukan banyak tenaga. Dengan adanya roda, dosen atau teknisi laboratorium dapat lebih mudah mengatur lokasi mesin sesuai kebutuhan praktikum, sehingga efisiensi waktu dan kenyamanan selama proses belajar mengajar dapat terjaga dengan baik.

Secara keseluruhan, konstruksi rangka mesin ini memperlihatkan desain yang kokoh dan simetris, cocok untuk digunakan sebagai dasar dari sistem CNC laser cutting. Kombinasi antara kekakuan struktur dan dimensi yang presisi memastikan stabilitas selama pengoperasian mesin. Desain sudut yang diperkuat serta penempatan lubang pemasangan di empat titik memungkinkan integrasi yang mudah dengan komponen lain seperti meja kerja, sistem rel, atau kepala laser itu sendiri.

3.3 Skematik Diagram Sistem Elektronik

Agar seluruh komponen dalam sistem mesin CNC ini dapat bekerja untuk mencapai suatu output sesuai dengan yang diharapkan, maka konstruksi fisik dari sistem perlu diintegrasikan sedemikian rupa dengan konstruksi sistem elektronik. Untuk menambahkan fungsi pembatas gerak pada sumbu-X dan sumbu-Y mesin CNC laser cutting berbasis kontroler Arduino ini, dibutuhkan peralatan dan bahan pendukung agar sistem dapat bekerja dengan aman dan presisi. Komponen utama yang diperlukan yaitu limit switch sebanyak dua buah (untuk masing-masing sumbu), kabel jumper sebagai penghubung, serta konektor untuk sambungan kabel. Semua komponen ini akan terhubung ke CNC shield yang terpasang ke Arduino Uno, dengan

konfigurasi pin yang sesuai pada masing-masing sumbu. Semua limit switch dihubungkan ke Arduino dengan konfigurasi normally closed. Penambahan fungsi pembatas ini sangat penting untuk mencegah gerakan berlebih (*overtravel*) yang dapat merusak struktur mekanik mesin atau menyebabkan kesalahan pemotongan.

Langkah penting yang terkait dengan penambahan limit switch adalah melakukan pengaturan perangkat lunak pada *firmware GRBL* yang tertanam di dalam Arduino. *GRBL* menyediakan parameter-parameter konfigurasi yang memungkinkan mesin CNC mengenali batas area kerja dan merespons input dari *limit switch* secara otomatis. Pengaktifan fungsi pembatas gerak pada mesin CNC *laser cutting* berbasis Arduino dilakukan dengan cara mengatur beberapa parameter penting di *firmware GRBL*. Langkah pertama yaitu mengaktifkan hard limit dengan perintah \$21=1. Pengaturan ini membuat mesin secara otomatis menghentikan gerakan apabila salah satu *limit switch* pada sumbu-X atau sumbu-Y terpicu, sehingga akan mencegah benturan atau kerusakan mekanik. Disamping hard limit, fitur homing juga diaktifkan melalui perintah \$22=1. Fitur ini diaktifkan agar mesin dapat melakukan kalibrasi posisi nol (*home*) secara otomatis saat dinyalakan atau di-reset. Gerak maksimal mesin dalam arah sumbu-X dan sumbu-Y diatur melalui parameter \$130, dan \$131, yang masing-masing mewakili panjang gerakan maksimal pada sumbu X, dan Y. Jika ukuran area kerja mesin adalah 400 mm untuk X, dan 240 mm untuk Y, sehingga dilakukan pengaturan parameter \$130=400 dan \$131=240 sesuai panjang actual dari masing-masing sumbu gerak. Untuk meningkatkan perlindungan gerakan, fungsi *soft limit* juga diaktifkan melalui setting parameter \$20=1. Fitur ini akan mencegah perintah gerakan yang melebihi batas area kerja, bahkan sebelum limit switch terpicu. Penyesuaian arah *homing* dilakukan melalui parameter \$23, serta mengatur jarak mundur (*pull-off*) setelah homing menggunakan \$27. Nilai-nilai ini memungkinkan arah dan respons mesin sesuai dengan konfigurasi fisik yang direncanakan.

3.4 Modul Laser

Guna meningkatkan performa mesin CNC laser sebagai media belajar mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, dilakukan upgrade modul laser dari 1Watt menjadi 80Watt. Jenis laser yang digunakan memiliki 80W dengan panjang gelombang 450nm dan tegangan input 12-14Volt. Ini merupakan jenis laser diode berdaya tinggi dengan panjang gelombang 450 nanometer (nm) atau berada pada spektrum cahaya biru. Modul laser ini kompatibel dengan sistem kontrol berbasis Arduino, di mana pengaturan intensitas sinar laser dilakukan melalui sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) dari *firmware GRBL*. Dengan daya optik maksimum hingga 80 Watt dan tegangan operasi 12 Volt DC, modul ini mampu melakukan proses pemotongan dan pengukiran (*engraving*) secara efisien pada berbagai material non-logam seperti kayu, MDF, akrilik, kulit, kertas tebal, karton, dan beberapa jenis plastik.

Laser yang digunakan dilengkapi sistem pendingin aktif berupa heatsink dan kipas yang menjaga kestabilan suhu selama proses kerja intensif. Modul ini memiliki jarak fokus optimal sekitar 40mm dan mampu menghasilkan diameter titik laser yang sangat kecil, sehingga cocok untuk pekerjaan pemotongan dan grafir yang membutuhkan detail tinggi. Kemampuan potongnya tergantung pada jenis dan ketebalan material, dan mampu melakukan engrave dengan akurasi tinggi pada permukaan benda kerja dengan kecepatan yang dapat disesuaikan melalui software kontrol seperti Laser *GRBL*. Spesifikasi lengkap dari modul laser yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi laser

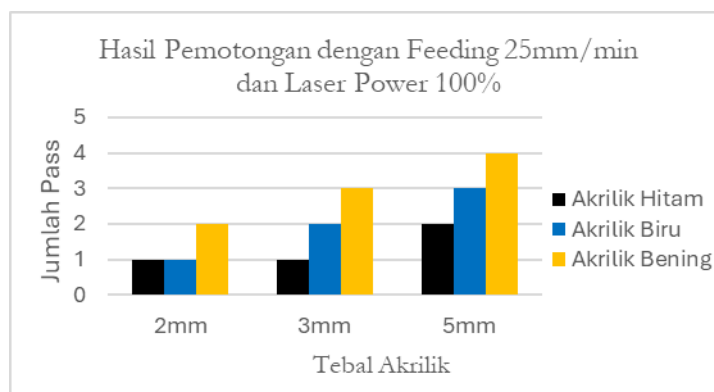
Parameter	Spesifikasi
Input voltage	DC, 12-24 Volt
Wave lenght	450nm (± 5 nm)
Focus lenght	4mm

Parameter	Spesifikasi
PWM modulation	0/5-12V, 0-10Hz
Fan speed	12000rpm
Operating temperature	0-60°C
Interface	XH2.54-3P Socket
Cable	3Pin
Air pump air intake	5L/min
Air pump filter device	Built-in air intake dust filter
Module size	145x76mm
Module weight	526.5g
Application	Engraving or cutting

Penggunaan modul laser ini dalam mesin CNC berbasis Arduino memberikan fleksibilitas, biaya implementasi yang terjangkau, serta kemudahan dalam pemrograman dan pemeliharaan, sehingga sangat ideal sebagai media pembelajaran praktikum CNC berbasis laser. Selain itu, integrasi laser 80W juga mendukung tujuan utama penelitian, yaitu meningkatkan performa pemotongan dan kekakuan struktural mesin, sehingga mampu menghadirkan sistem CNC laser cutting yang lebih presisi, stabil, dan aplikatif dalam konteks pendidikan vokasional teknik.

3.5 Pengujian Daya Tembus Laser

Kinerja mesin dalam hal kemampuan pemotongan material akrilik diukur dengan cara melakukan pengujian pemotongan akrilik berwarna yang terdiri dari akrilik bening, biru dan akrilik hitam. Masing-masing akrilik diuji untuk tiga tingkat ketebalan mulai dari 2mm, 3mm dan 5mm. Paramater mesin saat pengujian diatur dengan kondisi power 100% dengan *feeding* 25mm/menit. Uji penembusan dilakukan dengan jarak fokus 5mm. Hasil pengujian pemotongan akrilik untuk ketiga ukuran ketebalan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil pengujian daya tembus

Hasil pengujian pemotongan menunjukkan adanya perbedaan kemampuan tembus laser pada berbagai jenis dan ketebalan akrilik. Pada akrilik bening, pemotongan ketebalan 2 mm hanya berhasil menembus setelah dilakukan dua hingga tiga lintasan, sedangkan pada ketebalan 3 mm baru dapat tembus pada lintasan ketiga. Untuk ketebalan 5 mm, pemotongan tidak berhasil dilakukan meskipun sudah menggunakan tiga lintasan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa akrilik bening relatif lebih sulit ditembus oleh sinar laser, khususnya pada ketebalan di atas 3 mm. Berbeda dengan itu, akrilik biru memperlihatkan hasil yang lebih baik, di mana ketebalan 2 mm dapat tembus hanya dengan satu lintasan, sementara pada ketebalan 3 mm

dibutuhkan minimal dua lintasan. Untuk ketebalan 5 mm, pemotongan baru berhasil pada lintasan ketiga. Akrilik hitam menunjukkan performa pemotongan terbaik dibandingkan dua jenis lainnya. Pada ketebalan 2 mm dan 3 mm, material ini dapat ditembus hanya dengan satu lintasan, sedangkan pada ketebalan 5 mm dibutuhkan dua hingga tiga lintasan. Secara umum dapat disimpulkan bahwa tingkat keberhasilan pemotongan dipengaruhi oleh jenis warna akrilik dan jumlah lintasan yang digunakan, dengan urutan kemudahan pemotongan yaitu akrilik hitam, kemudian biru, dan terakhir bening.

Hasil pengujian pemotongan akrilik menunjukkan adanya perbedaan respons material terhadap sinar laser, baik ditinjau dari jenis warna maupun ketebalan. Secara umum, jumlah lintasan (*number of passes*) berperan penting dalam menentukan keberhasilan pemotongan, terutama pada material dengan ketebalan lebih dari 2 mm. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme interaksi antara panjang gelombang laser dengan sifat optik material, khususnya tingkat absorptansi cahaya pada permukaan akrilik.

Pada akrilik bening, pemotongan hanya efektif untuk ketebalan maksimum 3 mm, dengan kebutuhan minimal dua hingga tiga lintasan. Hal ini terjadi karena sifat transparansi akrilik bening menyebabkan sebagian besar energi laser diteruskan, sehingga energi panas yang diserap tidak cukup untuk mencapai kedalaman potong pada ketebalan yang lebih besar. Kondisi tersebut sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa material transparan cenderung memiliki hambatan tinggi terhadap proses pemotongan berbasis laser.

Akrilik biru memperlihatkan karakteristik yang lebih mudah ditembus dibanding akrilik bening. Warna biru memiliki kemampuan absorpsi yang lebih baik terhadap radiasi laser, sehingga energi yang diterima material meningkat dan menghasilkan proses pemotongan yang lebih efektif. Hal ini ditunjukkan dengan keberhasilan pemotongan pada ketebalan 5 mm menggunakan tiga lintasan, sedangkan pada ketebalan 2 mm material dapat ditembus hanya dengan satu lintasan.

Sementara itu, akrilik hitam menunjukkan hasil pemotongan paling optimal. Warna hitam memiliki sifat absorpsi cahaya yang tinggi, sehingga hampir seluruh energi laser diserap oleh material. Kondisi ini memungkinkan terjadinya peningkatan temperatur lokal yang signifikan, menghasilkan proses pencairan dan penguapan material yang lebih cepat. Dengan demikian, akrilik hitam pada ketebalan 2 mm dan 3 mm dapat dipotong hanya dengan satu lintasan, dan pada ketebalan 5 mm cukup dengan dua lintasan.

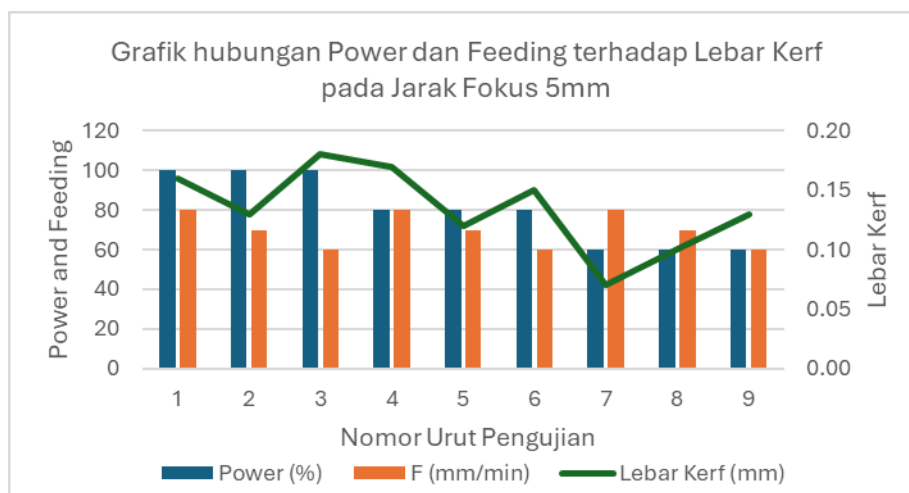
Temuan ini memperkuat pemahaman bahwa keberhasilan pemotongan laser tidak hanya ditentukan oleh ketebalan material, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh sifat optik material, khususnya warna dan tingkat transmisivitas terhadap radiasi laser. Oleh karena itu, dalam aplikasi pemotongan akrilik menggunakan laser, pemilihan jenis material menjadi faktor strategis untuk meningkatkan efisiensi proses.

3.6 Pengujian Lebar *Kerf*

Pengujian lebar *kerf* pada proses pemotongan akrilik dilakukan dengan memvariasikan jarak fokus lensa laser untuk mengetahui pengaruh posisi fokus terhadap kualitas hasil potongan. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan pada tiga variasi jarak fokus, yaitu 5 mm, 10 mm, dan 20 mm dari permukaan material. Setiap kondisi fokus dikombinasikan dengan beberapa variasi daya laser (*power*) dan kecepatan pemotongan (*feeding*) guna memperoleh data komprehensif mengenai pengaruh ketiga parameter tersebut terhadap lebar *kerf* yang dihasilkan. Pemilihan rentang fokus tersebut didasarkan pada asumsi bahwa jarak fokus yang lebih dekat akan memberikan konsentrasi energi yang lebih tinggi pada titik pemotongan, sedangkan fokus yang lebih jauh cenderung menurunkan densitas daya dan memperlebar zona termal. Hasil pengukuran lebar *kerf* pada setiap kondisi fokus kemudian dianalisis untuk menentukan posisi

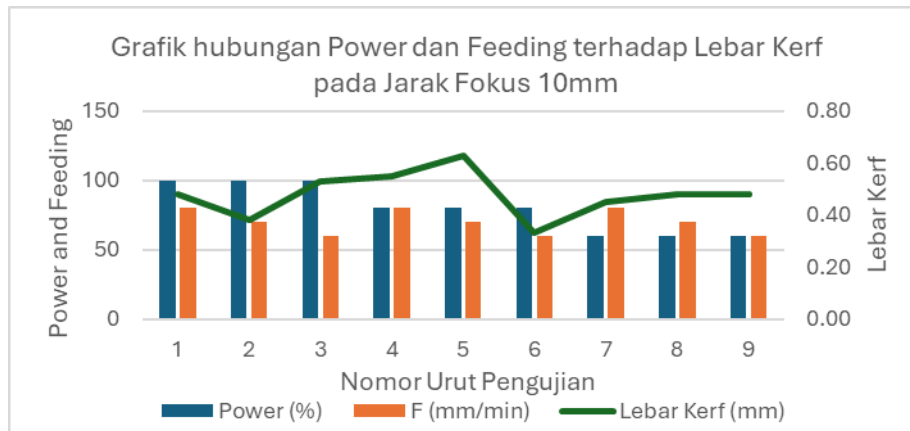
fokus optimum yang menghasilkan potongan paling presisi dan permukaan tepi yang paling halus.

Hasil pengujian hubungan antara daya laser (*power*) dan kecepatan pemotongan (*feeding*) terhadap lebar *kerf* pada jarak fokus 5 mm diperlihatkan pada Gambar 6. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa variasi kombinasi antara daya dan kecepatan pemotongan berpengaruh nyata terhadap nilai lebar *kerf* yang dihasilkan. Pada kondisi daya laser tinggi (100%) dengan *feeding* rendah (60 mm/menit), lebar *kerf* cenderung meningkat akibat energi panas yang berlebih pada area pemotongan, sehingga menyebabkan pelelehan material yang lebih luas. Sebaliknya, pada daya menengah (80%) dengan *feeding* lebih tinggi (70–80 mm/menit), lebar *kerf* menurun hingga kisaran 0,10–0,15 mm, menunjukkan bahwa kombinasi tersebut menghasilkan pemotongan yang lebih stabil dan efisien. Nilai lebar *kerf* minimum dicapai pada pengujian ke-7 dengan kombinasi parameter *power* 80% dan *feeding* 80 mm/menit, yang menghasilkan *kerf* sekitar 0,11 mm.



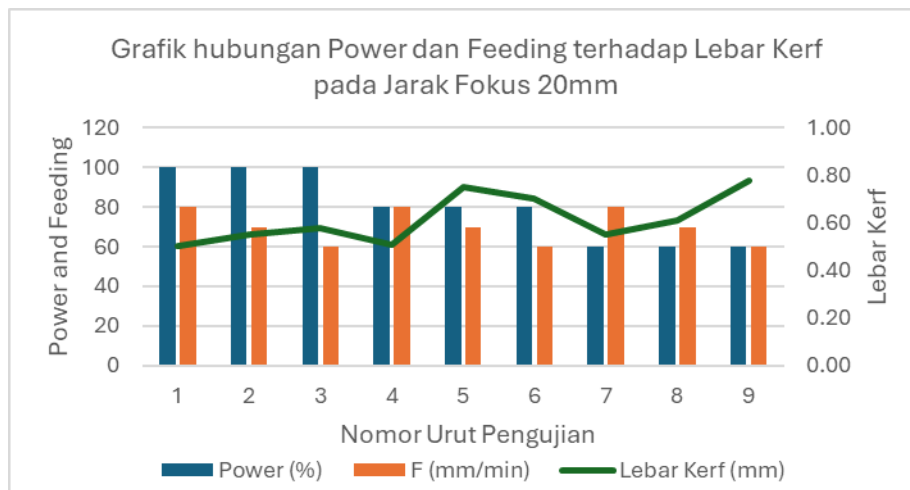
Gambar 6. Hasil pengujian lebar *kerf* dengan jarak fokus 5mm

Hasil pengujian hubungan antara daya laser (*power*) dan kecepatan pemotongan (*feeding*) terhadap lebar *kerf* pada jarak fokus 10 mm menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan lebar *kerf* seiring dengan kenaikan daya laser dan penurunan kecepatan pemotongan. Seperti terlihat pada Gambar 7, kombinasi *power* tinggi (80–100%) dengan *feeding* rendah menghasilkan lebar *kerf* yang lebih besar, dengan nilai maksimum mencapai sekitar 0,65 mm. Sebaliknya, pada *feeding* yang lebih tinggi, lebar *kerf* cenderung menurun hingga di bawah 0,45 mm. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya energi panas yang diserap material berbanding lurus dengan daya laser dan berbanding terbalik dengan kecepatan gerak kepala pemotong. Semakin besar daya laser dan semakin lambat pergerakan *feeding*, maka akumulasi panas di zona pemotongan meningkat, menyebabkan pelelehan material lebih luas dan menghasilkan potongan yang lebih lebar. Oleh karena itu, pengaturan parameter pemotongan yang seimbang antara *power* dan *feeding* menjadi faktor penting untuk memperoleh lebar *kerf* yang minimum dan hasil potongan yang presisi.



Gambar 7. Hasil pengujian lebar *kerf* dengan jarak fokus 10mm

Pada jarak fokus 20 mm, hasil pengujian menunjukkan bahwa lebar *kerf* mengalami peningkatan paling besar, dengan kisaran antara 0,60–0,85 mm. Gambar 8 memperlihatkan bahwa meskipun daya laser dinaikkan hingga 100%, hasil pemotongan menjadi kurang efisien dan *kerf* yang dihasilkan cenderung melebar secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh penurunan intensitas energi laser yang mencapai permukaan material akibat posisi fokus yang terlalu jauh dari titik konvergensi optimum. Sinar laser yang telah menyebar menghasilkan distribusi energi yang lebih luas tetapi kurang padat, sehingga material tidak terpotong dengan presisi, melainkan lebih banyak mengalami pelelehan dan karbonisasi di tepi potongan.



Gambar 8. Hasil pengujian lebar *kerf* dengan jarak fokus 20mm

Berdasarkan ketiga grafik hasil pengujian, terlihat bahwa jarak fokus memiliki pengaruh yang signifikan terhadap lebar *kerf* yang dihasilkan. Pada jarak fokus 5 mm, lebar *kerf* rata-rata berada pada kisaran 0,10–0,18 mm, yang merupakan hasil paling sempit di antara ketiga kondisi fokus. Hal ini menunjukkan bahwa pada posisi fokus yang mendekati permukaan material, titik konvergensi sinar laser berada tepat di area pemotongan, sehingga energi panas terpusat dengan baik dan menghasilkan potongan yang tipis serta presisi.

Ketika jarak fokus dinaikkan menjadi 10 mm, lebar *kerf* meningkat secara nyata menjadi 0,40–0,60 mm. Kondisi ini menandakan bahwa titik fokus laser mulai bergeser sedikit menjauh dari permukaan akrilik, menyebabkan distribusi energi panas menyebar lebih luas dan mengakibatkan zona leleh yang lebih besar di sekitar jalur potong. Akibatnya, kualitas tepi potongan menurun dan *kerf* menjadi lebih lebar.

Pada jarak fokus 20 mm, lebar *kerf* meningkat lebih lanjut hingga mencapai kisaran 0,60–0,85 mm. Fokus yang terlalu jauh dari permukaan material membuat intensitas energi per satuan area berkurang secara signifikan. Proses pemotongan menjadi kurang efisien karena sebagian besar energi laser terdispersi sebelum mencapai permukaan, sehingga menghasilkan lebar *kerf* yang paling besar dan tepi potongan yang relatif kasar.

Secara umum, tren dari ketiga grafik menunjukkan bahwa semakin besar jarak fokus, semakin lebar *kerf* yang dihasilkan, dengan kombinasi daya tinggi dan feeding rendah menghasilkan *kerf* yang paling besar pada semua jarak fokus. Sebaliknya, kombinasi daya menengah dengan kecepatan pemotongan tinggi cenderung menghasilkan *kerf* yang lebih sempit dan permukaan potongan yang lebih bersih.

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Kumar et al. [15], Nininkas [16] dan Prajapati et al.[1] yang melaporkan bahwa ketepatan fokus merupakan parameter kunci dalam proses laser cutting akrilik. Mereka menemukan bahwa penyimpangan fokus ± 2 mm dari posisi optimum dapat meningkatkan lebar *kerf* hingga dua kali lipat akibat perubahan distribusi energi pada titik potong. Hal ini terjadi karena ketika posisi fokus bergeser dari titik optimum, densitas energi laser pada permukaan material berkurang, sehingga proses pemotongan menjadi kurang efisien. Energi yang seharusnya terkonsentrasi pada satu titik menyebar ke area yang lebih luas, menyebabkan pelebaran area leleh (*heat affected zone*) dan meningkatkan ketidakteraturan pada dinding potongan. Dengan demikian, pengaturan fokus yang tepat sangat penting untuk memperoleh hasil pemotongan dengan kualitas tinggi, baik dari segi lebar *kerf* yang sempit maupun permukaan yang halus.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jarak fokus merupakan parameter paling dominan yang menentukan rentang lebar *kerf* yang dihasilkan. Secara umum, terlihat tren bahwa semakin besar jarak fokus, semakin besar pula lebar *kerf* yang dihasilkan. Pada jarak fokus 5mm, rentang lebar *kerf* berada pada nilai terkecil (0.08mm hingga 0.18mm), yang mengindikasikan kondisi titik fokus laser yang paling ideal untuk sayatan sempit. Kontras dengan hal tersebut, Jarak fokus 20mm menghasilkan rentang lebar *kerf* terbesar (0.50mm hingga 0.80mm). Selain itu, dalam setiap kondisi jarak fokus, lebar *kerf* dipengaruhi oleh variasi power (daya) dan feeding (kecepatan makan). Secara spesifik, titik-titik pengujian yang menghasilkan lebar *kerf* maksimum sering kali dikaitkan dengan penggunaan power yang tinggi, sementara kondisi power dan feeding yang berbeda-beda digunakan secara sistematis untuk menemukan kondisi optimal lebar *kerf* minimum pada setiap jarak fokus. Oleh karena itu, untuk mendapatkan lebar *kerf* paling sempit, jarak fokus 5mm adalah kondisi yang paling efektif, diikuti dengan penyesuaian yang tepat pada power dan feeding.

Berdasarkan hasil pemotongan akrilik dengan kondisi konstan 100% daya laser dan 25mm/menit *feeding*, dapat disimpulkan bahwa ketebalan material dan warnanya secara signifikan menentukan jumlah pass (lintasan) yang diperlukan untuk pemotongan tembus. Secara fundamental, terjadi korelasi positif di mana semakin tebal material akrilik, semakin banyak pass yang dibutuhkan, meningkat dari 1-2 pass pada 2mm hingga 2-4 pass pada 5mm. Faktor warna menunjukkan perbedaan efisiensi yang kontras: Akrilik bening adalah material

yang paling sulit dipotong karena selalu membutuhkan jumlah pass terbanyak di setiap ketebalan (mencapai 4 pass untuk 5mm), ini mengindikasikan penyerapan energi laser yang paling rendah. Sebaliknya, akrilik hitam dan akrilik biru menunjukkan efisiensi pemotongan yang lebih baik, hanya membutuhkan 1 pass untuk ketebalan 2mm dan 1-2 pass untuk ketebalan 3mm.

5. SARAN

Disarankan untuk menguji lebih banyak varian warna akrilik dan mengukur secara spesifik tingkat penyerapan energi laser pada setiap pigmen warna. Ini dapat memberikan pemahaman mendalam mengapa akrilik bening membutuhkan energi kumulatif tertinggi untuk pemotongan tembus.

Penelitian di masa depan dapat memasukkan variasi penggunaan gas bantu (misalnya, udara terkompresi, Nitrogen, atau Oksigen) dan tekanannya untuk melihat dampaknya terhadap lebar kerf, kualitas tepi potong, dan pembentukan kerak, terutama pada pemotongan akrilik bening.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Unit P3M Politeknik Negeri Lhokseumawe yang telah memberi dukungan finansial terhadap pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Pajaziti, O. Tafilaj, E. Hasanaj, and A. Gjelaj, "Optimization of CNC Working Time Depending on the Positioning of the Tools in the Magazine," *Machines*, vol. 12, no. 8, 2024, doi: 10.3390/machines12080512.
 - [2] M. Sarvas, M. Holub, T. Marek, J. Prochazka, F. Bradac, and P. Blecha, "Influence of Machine Tool Operating Conditions on the Resulting Circularity and Positioning Accuracy," *Machines*, vol. 12, no. 5, 2024, doi: 10.3390/machines12050352.
 - [3] U. Aulia and M. Fuadi, "Pengaruh Kondisi Pemotongan Terhadap Gaya Potong Pada Proses Milling S45C," vol. 10, no. 1, pp. 326–333, 2024.
 - [4] W. Li, "Advanced Manufacturing and Precision Machining," Dec. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app142411642.
 - [5] K. C. Yao, D. C. Chen, C. H. Pan, and C. L. Lin, "The Development Trends of Computer Numerical Control (CNC) Machine Tool Technology," *Mathematics*, vol. 12, no. 13, 2024, doi: 10.3390/math12131923.
 - [6] O. Adegbemisola, K. Mpofu, and B. Kareem, "Upgrading the versatility of conventional machine tools using the mechatronic approach," *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, p., 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2365908.
 - [7] M. S. Alsoufi, S. A. Bawazeer, M. W. Alhazmi, and H. Alhazmi, "Dimensional Accuracy and Measurement Variability in CNC-Turned Parts Using Digital Vernier Calipers and Coordinate Measuring Machines Across Five Materials," *Materials (Basel)*, pp. 1–26, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18122728>.
 - [8] B. Kasim, U. Usman, S. Sumardi, M. Razi, E. Saputra, and A. Harmin, "Rancang Bangun Mesin CNC Laser Engraving Berbasis Arduino untuk Edukasi Teknologi CNC," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 11, no. 1, p. 1, 2025, doi: 10.35308/jmkn.v11i1.11693.
 - [9] B. Kasim *et al.*, "Performance Analysis of RFID-Based Smart Door Lock Controlled by Arduino," *J. Adv. Res. Appl. Mech.*, vol. 122, no. 1, pp. 163–174, 2024, doi:
-

- 10.37934/aram.122.1.163174.
- [10] Z. Wang, R. Ye, and J. Xiang, "The performance of textured surface in friction reducing: A review," *Tribol. Int.*, vol. 177, p. 108010, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108010>.
 - [11] K. Bukhari, Y. Azwar, I. Yusuf, Darmein, and Mawardi, "Optimization of CNC machining parameters to improve surface roughness quality of the AL6061 material using the Taguchi method," *Polimesin*, vol. 21, no. 4, pp. 408–413, 2023.
 - [12] W. Li, "Advanced Manufacturing and Precision Machining," pp. 4–7, 2024.
 - [13] I. O. P. C. Series and M. Science, "Low cost and open source software-based CNC router for machining contours Low cost and open source software-based CNC router for machining contours," *Mater. Sci. Eng.*, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/872/1/012084.
 - [14] M. Alsaadawy, M. Dewidar, A. Said, I. Maher, and T. A. Shehabeldeen, *A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals*. Springer London, 2024. doi: 10.1007/s00170-023-12768-1.
 - [15] M. C. Mohankumar, B. Arun, N. Ponmugil, J. Santhoshkumar, and U. G. Scholar, "Design and Analysis of Jet Nozzle in Laser Cutting Machine," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, no. June, pp. 221–225, 2022, [Online]. Available: www.irjet.net
 - [16] K. Ninikas, J. Kechagias, and K. Salonitis, "The impact of process parameters on surface roughness and dimensional accuracy during co2 laser cutting of pmma thin sheets," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 5, no. 3, 2021, doi: 10.3390/jmmp5030074.
-