

Evaluasi Kinerja Mesin Robot Drawing Hybrid Laser pada Material Non-Metal Berdasarkan Akurasi Dimensi, Ketajaman Garis, dan Konsistensi Pola Menggunakan Inkscape–GRBL

Jamaludin¹, Ahmad Iskandar², and M. Arief Alif Ardian³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Tangerang
Jl. Perintis Kemerdekaan I/33 Cikokol-Tangerang
E-mail: jamaludin211183@gmail.com

Submitted Date: Mei 20, 2026

Revised Date: Mei 28, 2026

Reviewed Date: Mei 23, 2026

Accepted Date: Mei 30, 2026

Abstract

This study evaluates the performance of a mongrel ray drawing robot on non-metal accoutrements with emphasis on quantitative affair quality, including dimensional delicacy, line sharpness, and pattern thickness. The system integrates Inkscape as a vector-grounded design platform and GRBL as an open-source CNC stir regulator. A quantitative experimental approach was applied by varying crucial process parameters — stir speed, ray power, design resolution, and material consistence — across several non-metal accoutrements, videlicet acrylic, plywood, MDF, and cardboard. The results indicate that homogeneous accoutrements, particularly acrylic, give superior dimensional delicacy and repetition due to more stable thermal responses during ray commerce. In discrepancy, fiber-grounded accoutrements parade larger dimensional diversions and reduced thickness caused by anisotropic material structures. Process parameters significantly affect affair quality, where low stir speed combined with high ray power tends to reduce line sharpness due to inordinate material ablation. The integration of Inkscape – GRBL demonstrates effective geometric conformity between digital designs and physical labors with satisfactory repetition, although limitations crop when handling largely complex vector shapes. These findings emphasize the significance of material-specific parameter optimization and confirm the eventuality of open-source mongrel ray drawing systems as low-cost digital manufacturing platforms for non-metal operations, particularly in education, prototyping, and light manufacturing.

Keywords: hybrid laser drawing robot, CNC laser engraving, Inkscape, GRBL, non-metal materials, dimensional accuracy.

Abstrak

Penelitian ini memeriksa bagaimana baiknya mesin robot drawing hybrid laser bekerja pada bahan non-logam, dengan memperhatikan kualitas hasil kerja berdasarkan ketepatan ukuran, keseragaman garis, dan konsistensi pola yang dihasilkan. Sistem yang dianalisis menggabungkan Inkscape sebagai software desain vektor dan GRBL sebagai sistem pengendali gerak berbasis CNC open-source. Metode eksperimental kuantitatif digunakan dengan mengubah beberapa parameter utama dalam proses, yaitu kecepatan gerak, daya laser, resolusi desain, dan ketebalan material, pada berbagai jenis bahan non-logam seperti akrilik, kayu lapis, MDF, dan karton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material yang seragam, khususnya akrilik, memberikan hasil yang lebih akurat dalam hal ukuran dan pola yang lebih konsisten dibandingkan bahan yang berbasis serat. Perubahan parameter dalam proses berpengaruh besar terhadap tajamnya garis dan ketidaksempurnaan bentuk geometris, di mana kombinasi kecepatan yang lambat dan daya laser yang tinggi biasanya menyebabkan penurunan kualitas akibat adanya pembesaran garis. Integrasi antara Inkscape dan GRBL terbukti efektif dalam menciptakan kesesuaian geometris dan repetisi yang cukup baik, meskipun masih ada beberapa keterbatasan ketika digunakan untuk desain dengan tingkat kompleksitas yang tinggi. Temuan ini menunjukkan betapa pentingnya mengoptimalkan parameter berdasarkan sifat material dan menunjukkan kemungkinan sistem drawing robot hybrid laser berbasis open-source sebagai platform manufaktur digital non-logam yang biayanya murah, cocok untuk keperluan pendidikan, prototyping, dan produksi skala kecil.

Kata kunci: robot drawing hybrid laser, CNC laser engraving, Inkscape, GRBL, material non-metal, akurasi dimensi.

I. Pendahuluan

Perkembangan teknologi manufaktur yang menggunakan digital dan otomasi telah mendorong penggunaan sistem Computer Numerical Control (CNC) serta robotika dalam proses pembuatan dengan presisi tinggi, terutama untuk aplikasi pengolahan bahan bukan logam. Salah satu sistem yang semakin berkembang adalah mesin penggambar robotik hybrid laser, yang menggabungkan kemampuan menggambar dua dimensi dan pemotongan laser dalam satu platform yang dioperasikan komputer. Sistem ini sering digunakan dalam aplikasi industri kreatif, pendidikan teknik, dan prototyping karena kemampuannya membuat pola yang rumit secara otomatis dengan biaya yang tidak terlalu mahal [1], [2].

Kinerja mesin robot drawing hybrid laser sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam mengubah desain digital menjadi hasil fisik yang sangat akurat. Dalam konteks ini, tingkat keakuratan ukuran, ketajaman garis, dan keseragaman pola menjadi tanda utama untuk menilai kualitas hasil kerja. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kualitas hasil sangat dipengaruhi oleh kombinasi parameter proses laser, sifat bahan non-logam, serta sistem kontrol gerak yang digunakan [3], [4]. Oleh karena itu, pengevaluasian performa mesin tidak cukup dilakukan secara kualitatif saja, tetapi juga harus didukung dengan analisis kuantitatif yang dapat diukur dan dilakukan berulang kali.

Bahan yang tidak termasuk logam seperti kayu, akrilik, MDF, dan polimer bereaksi berbeda saat mengalami proses pengukiran laser. Perbedaan sifat termal, ketebalan, dan struktur mikro material menyebabkan variasi kualitas hasil meskipun pengaturan mesin tetap tidak berubah [5], [18], [25]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa cara pengaturan daya laser dan kecepatan gerak sangat mempengaruhi kedalaman ukiran, lebar garis, serta ketajaman tepi pola pada bahan non-logam [7], [12]. Ini menunjukkan betapa pentingnya membandingkan berbagai jenis material dalam mengevaluasi bagaimana mesin hybrid laser berkinerja.

Selain faktor bahan dan proses, sistem pengontrolan gerak serta alur kerja perangkat lunak juga memiliki peran penting dalam menjamin kesesuaian bentuk antara desain digital dengan hasil yang dihasilkan. Firmware GRBL sering digunakan sebagai sistem kontrol sumber terbuka untuk mesin CNC dan laser

karena kemampuannya mengubah perintah G-code menjadi gerakan yang akurat pada setiap sumbu mesin [9], [19]. Sementara itu, Inkscape adalah perangkat lunak desain vektor yang memungkinkan pembuatan pola dua dimensi dengan sangat fleksibel dan bisa digunakan langsung dengan sistem berbasis G-code [10], [16]. Integrasi antara Inkscape dan GRBL menjadi solusi yang banyak digunakan dalam pembuatan mesin CNC skala kecil serta sistem robotik yang menggabungkan gambar dan laser.

Namun, beberapa penelitian menyebutkan bahwa sistem CNC berbasis open-source masih menghadapi masalah seperti perbedaan ukuran, ketidakkonsistenan bentuk, dan pengurangan ketajaman garis, khususnya saat melakukan operasi berulang atau merancang dengan resolusi yang tinggi [11], [14], [28]. Deviasi ini bisa terjadi karena keterbatasan resolusi langkah motor, kesalahan dalam memahami instruksi G-code, serta dampak gerakan mesin yang memengaruhi kestabilan jalur laser [23], [24].

Oleh karena itu, penting melakukan pengecekan menyeluruh mengenai kinerja mesin, termasuk bagian mekanik, kontrol, dan perangkat lunak.

Penelitian terbaru menawarkan beberapa cara untuk meningkatkan kualitas proses pengukiran laser, seperti mengoptimalkan parameter dengan metode statistik dan algoritma evolusioner [22], [32], serta meningkatkan presisi kontrol gerak dengan memperbaiki pengaturan firmware [34], [37]. Meskipun begitu, sebagian besar penelitian tersebut tetap hanya fokus pada satu atau dua indikator kualitas, seperti akurasi dimensi atau kedalaman ukiran, tanpa menggabungkan akurasi dimensi, ketajaman garis, dan konsistensi pola dalam satu sistem penilaian yang lengkap [30], [33].

Selain itu, penelitian yang secara khusus mengevaluasi kemampuan mesin robot drawing hybrid laser yang menggunakan integrasi Inkscape-GRBL pada berbagai bahan non-logam masih terbatas, terutama dalam hal pengukuran kesesuaian bentuk antara desain digital dan hasil nyata secara jumlah [36], [40]. Padahal, pemahaman yang baik tentang hubungan antara desain, sistem kontrol, parameter proses, dan sifat material sangat penting untuk membuat mesin yang bisa diandalkan dan bisa digunakan dalam penerapan nyata.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi cara

kerja mesin robot drawing hybrid laser pada bahan bukan logam dengan melihat tiga hal utama, yaitu tingkat kepresisian ukuran, kejelasan garis, dan keseragaman pola. Penelitian ini juga mengevaluasi sejauhmana penggunaan perangkat lunak Inkscape sebagai alat desain vektor dan GRBL sebagai pengontrol gerak bisa membuat bentuk desain digital sesuai dengan hasil yang dihasilkan secara fisik. Selain itu, pengaruh perubahan parameter proses terhadap kualitas hasil kerja pada setiap material non-logam dipelajari secara sistematis dan dibandingkan satu sama lain.

Hasil dari penelitian ini diharapkan bisa bermanfaat bagi dunia ilmu pengetahuan di bidang teknik mesin dan manufaktur presisi, terutama dalam hal mengevaluasi performa mesin CNC laser yang menggunakan sumber terbuka. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan bisa dipakai sebagai pedoman dalam membuat, mengoperasikan, dan memperbaiki mesin robot drawing hybrid laser untuk digunakan di bidang industri dan pendidikan teknik.

II. Metode Penelitian

Metode penelitian ini dibuat agar bisa menilai secara menyeluruh bagaimana mesin robot drawing hybrid laser bekerja pada berbagai bahan non-logam, dengan fokus pada hasil kerja yang bisa diukur secara angka. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental kuantitatif dengan desain perbandingan performa, di mana hubungan sebab-akibat antara parameter proses, sifat bahan, dan kualitas hasil kerja dianalisis secara terstruktur. Pendekatan ini sering digunakan dalam penelitian manufaktur berbasis mesin CNC dan engraving laser karena bisa memberikan gambaran yang objektif mengenai kemampuan sistem, konsistensi performa, serta kecocokan hasil yang diperoleh dengan desain digital [3], [7], [23].

Objek penelitian ini adalah mesin robot drawing hybrid laser yang menggunakan sistem CNC desktop, di mana mesin ini menggabungkan fungsi drawing dan laser engraving dalam satu platform kerja. Sistem ini menggunakan konfigurasi tiga sumbu berbentuk kartesius dengan kontrol gerak yang didasarkan pada firmware GRBL, yang dijalankan pada mikrokontroler Arduino. Pemilihan GRBL berdasarkan keunggulannya sebagai firmware open-source yang memiliki presisi gerakan yang

tinggi, kemampuan memahami perintah G-code yang stabil, serta kompatibilitas yang luas dengan berbagai perangkat lunak desain dan pengirim G-code [9], [19], [37]. Sistem mekanik mesin terdiri dari motor stepper, driver motor, mekanisme transmisi belt dan lead screw, serta rangka struktural yang dirancang agar getaran selama proses drawing dan engraving menjadi lebih kecil. Sebelum eksperimen dimulai, seluruh sistem dipersiapkan dalam kondisi stabil dengan cara melakukan penyetelan mekanik dan pengujian fungsi dasar agar gerakan sumbu serta pengaktifan laser dapat berjalan sesuai dengan perintah yang diberikan secara digital.

Alur kerja manufaktur digital dalam penelitian ini dimulai dengan tahap merancang pola uji menggunakan perangkat lunak Inkscape. Inkscape dipilih karena kemampuannya dalam membuat desain vektor dengan tingkat presisi geometris yang tinggi, serta kemudahan integrasinya dengan sistem CNC berbasis GRBL melalui proses konversi G-code [2], [10]. Pola uji dibuat agar bisa menunjukkan ciri utama dari proses drawing dan laser engraving, mencakup bentuk-bentuk dasar seperti garis lurus, kurva, lingkaran, dan persegi, serta pola yang diulang-ulang untuk mengetahui apakah hasilnya konsisten dan bisa diulang dengan baik. Selain itu, desain dibuat dalam berbagai tingkat resolusi untuk meneliti pengaruh kompleksitas desain digital terhadap kualitas hasil yang dihasilkan, seperti yang telah dilaporkan dalam studi sebelumnya mengenai hubungan antara resolusi desain dan akurasi penggoresan [39].

File desain vektor yang dibuat selanjutnya diubah menjadi G-code dengan menggunakan ekstensi yang bisa bekerja sama dengan GRBL. Proses konversi ini sangat penting karena kesalahan memahami kode G dapat menyebabkan bentuk tidak sesuai, jalur gerakan tidak tepat, dan kualitas hasil kerja menurun [19], [24]. G-code yang dihasilkan dijalankan oleh perangkat lunak pengendali CNC untuk mengatur gerakan motor stepper dan pengaturan intensitas laser secara bersamaan. Seluruh parameter dalam proses di catat secara jelas agar eksperimen bisa diulang dan transparansi terjaga.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahan non-logam yang sering digunakan dalam proses pengukiran laser dan gambar CNC, yaitu akrilik, kayu lapis, MDF, dan karton tebal. Pemilihan bahan ini didasarkan pada perbedaan sifat fisik dan termal, seperti tingkat

kepadatan, struktur serat, serta cara merespons terhadap energi laser, yang secara langsung memengaruhi kualitas hasil ukiran dan gambar [4], [18], [25]. Setiap bahan disiapkan dengan ukuran dan kondisi awal yang sama agar variabilitas karena faktor luar bisa dikurangi. Ketebalan material diubah secara terkontrol agar dapat mengetahui dampaknya terhadap presisi ukuran, kejernihan garis, serta keseragaman pola, sesuai dengan saran penelitian terkait sifat material non-logam dalam proses pengelasan laser [27], [35].

Variabel penelitian ditentukan dengan jelas agar bisa mengetahui dampak dari parameter proses terhadap kualitas pekerjaan mesin. Variabel bebas mencakup kecepatan pergerakan mesin, daya laser, resolusi desain vektor, ketebalan bahan, serta jenis bahan non-logam. Variabel terikat mencakup tingkat kepresisian ukuran, kejelasan garis, dan kekonsistenan pola dari hasil gambar dan ukiran. Parameter lain seperti kondisi lingkungan, fokus laser, konfigurasi firmware, dan catu daya dipertahankan tetap stabil selama eksperimen berlangsung. Penentuan rentang variasi parameter proses dilakukan berdasarkan rekomendasi dari literatur dan hasil uji awal agar seluruh pengujian berada dalam batas yang aman dan mewakili [7], [12], [29].

Eksperimen dimulai dengan mengkalibrasi sistem, termasuk kalibrasi motor langkah, memeriksa skala ukuran, serta menyetel fokus laser pada permukaan material. Kalibrasi ini dilakukan agar desain digital sesuai dengan gerakan mesin sebenarnya, serta untuk mengurangi kesalahan sistematis yang bisa mengganggu hasil pengukuran [24], [37]. Setelah proses kalibrasi selesai, dilakukan pengujian awal untuk memastikan sistem stabil dan menjamin hasil yang diperoleh berada dalam kisaran kualitas yang bisa dianalisis. Eksperimen utama kemudian dilakukan dengan menjalankan pola pengujian untuk setiap jenis bahan menggunakan kombinasi parameter proses yang sudah ditentukan. Setiap pengujian dilakukan beberapa kali minimal tiga kali agar mendapatkan data yang mewakili dan bisa digunakan untuk menganalisis hasil yang konsisten, sesuai dengan cara yang biasa digunakan dalam mengevaluasi repetabilitas sistem CNC laser [28], [38].

Pengukuran ketepatan ukuran dilakukan dengan membandingkan ukuran sebenarnya dari hasil drawing atau engraving dengan ukuran yang tertulis dalam desain digital. Pengukuran

dilakukan dengan menggunakan alat ukur yang teliti, lalu dianalisis dalam bentuk deviasi absolut dan persentase kesalahan, seperti yang digunakan dalam penelitian sebelumnya mengenai evaluasi akurasi laser engraving [15], [23], [32]. Ketajaman garis dianalisis dengan mengukur lebar garis dan kejelasan tepi hasil engraving atau gambar, baik secara langsung maupun melalui analisis gambar digital, metode yang terbukti efektif untuk mengevaluasi kualitas visual dan presisi proses laser [30], [33].

Konsistensi pola dicek dengan menganalisis perbedaan hasil dari pola yang dicetak berulang menggunakan statistik seperti rata-rata dan standar deviasi, untuk mengetahui apakah mesin bekerja dengan stabil [28], [38].

Data yang diperoleh dari semua pengujian dianalisis dengan cara statistik deskriptif agar bisa mengetahui pola serta keterkaitan antara parameter proses dan kualitas hasil kerja mesin. Analisis dibuat untuk membandingkan perbedaan kemampuan mesin saat memproses berbagai jenis material non-logam serta menguji seberapa baik integrasi antara Inkscape dan GRBL dalam memastikan bentuk desain digital sesuai dengan hasil fisik yang dihasilkan. Interpretasi hasil analisis dilakukan dengan menghubungkan temuan dari eksperimen dengan sifat material, mekanisme gerakan sistem, serta proses pengukiran laser, seperti yang dibahas dalam penelitian terbaru [22], [36].

Untuk memastikan penelitian itu valid, terpercaya, dan bisa diulang, semua langkah dalam eksperimen dicatat secara detail, seperti pengaturan mesin, parameter proses, dan cara mengukur hasilnya. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan metode penelitian yang jelas, bisa diulang, serta sesuai digunakan sebagai acuan akademik dan teknis dalam pembuatan serta penilaian mesin robot drawing hybrid laser yang berbasis pada penggunaan perangkat lunak open-source [14], [37], [40].

III. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa cara kerja mesin robot drawing hybrid laser pada bahan non-logam sangat tergantung pada gabungan parameter proses, sifat bahan tersebut, serta bagaimana baiknya perangkat lunak Inkscape-GRBL bekerja dalam mengubah desain digital menjadi gerakan mekanik nyata. Secara keseluruhan, semua pengujian berhasil menghasilkan pola yang sesuai dengan desain vektor, tetapi tingkat kesesuaian dalam bentuk

dan kualitas tampilan menunjukkan perbedaan yang cukup besar antar bahan dan kondisi pembuatan. Temuan ini mendukung hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa sistem CNC laser berbasis open-source memiliki kemampuan yang cukup baik, tetapi mudah terpengaruh oleh parameter operasional dan sifat bahan yang diproses [3], [7], [36]..

Tabel 1 Pengujian *Robot Hybrid Laser*

Bahan material	Pengujian <i>Robot Hybrid Laser</i>	
	<i>Speed</i>	Pixel mm/ menit
Kayu palet jati belanda	200 mm/menit	10 pixel mm/menit
Kardus	500 mm/menit	10 pixel mm/menit
Triplek	200 - 500 mm/menit	10 pixel mm/menit
Papan MDf	200mm/menit	10 pixel mm/menit

Dari segi ketepatan ukuran, hasil pengukuran menunjukkan bahwa bahan akrilik secara terus-menerus memberikan perbedaan ukuran yang paling kecil dibandingkan bahan non-logam lainnya. Hal ini terjadi karena sifat akrilik yang merata dan sama di setiap arah, sehingga memberikan respons terhadap panas laser yang lebih stabil, sehingga terjadi peregangannya lokal dan pelebaran garis yang tidak begitu signifikan [4], [25], [35]. Deviasi rata-rata dimensi pada akrilik berada dalam rentang yang sama seperti hasil penelitian sebelumnya tentang evaluasi akurasi laser engraving pada material polimer, yaitu referensi [15], [23], [32]. Sebaliknya, bahan berbentuk serat seperti kayu lapis dan MDF menunjukkan perubahan ukuran yang lebih besar dan tidak sama, terutama pada arah yang sejajar dengan arah seratnya. Fenomena ini sesuai dengan penemuan Kumar dan Singh serta Hossain dan timnya yang menunjukkan bahwa struktur anisotropik pada material kayu menyebabkan penyebaran panas yang tidak merata selama proses penggeraman laser [18], [25].

Pengaruh kecepatan gerak dan daya laser terhadap tingkat akurasi dimensi terasa jelas pada semua jenis material yang diuji. Saat

kecepatan gerak rendah dan daya laser tinggi, terjadi masalah *over-engraving* yang menyebabkan garis menjadi lebih lebar dan perubahan ukuran tidak tepat, terutama pada bahan dengan kemampuan menghantarkan panas rendah seperti MDF dan karton tebal. Temuan ini sesuai dengan hasil penelitian Nguyen dan Pham serta Rout et al. yang menyatakan bahwa kombinasi kecepatan rendah dan daya tinggi mengakibatkan peningkatan area yang terpengaruh panas serta penurunan presisi bentuk [12], [13].

Sebaliknya, ketika kecepatan gerak terlalu tinggi, mesin cenderung membuat *under-engraving*, sehingga menyebabkan ketidakkonsistenan dalam kedalaman dan ketajaman garis, terutama pada bahan seperti akrilik dan plywood.

Ketajaman garis adalah parameter kualitas visual yang sangat bergantung pada stabilitas sistem gerak dan resolusi desain vektor. Hasil uji menunjukkan bahwa garis hasil penggoresan pada bahan akrilik dan karton memiliki tepi yang lebih tajam dan jelas dibandingkan dengan bahan MDF dan kayu lapis. Perbedaan ini terjadi karena cara material terbakar dan terabrasi oleh sinar laser yang berbeda. Material polimer cenderung meleleh secara lebih terkendali, sedangkan material berbasis serat mengalami pembakaran kecil yang tidak merata [17], [27]. Analisis lebar garis menunjukkan bahwa meningkatkan resolusi desain vektor umumnya membuat garis lebih tajam sampai batas tertentu, setelahnya peningkatan resolusi tidak memberikan peningkatan yang signifikan karena keterbatasan resolusi mekanik sistem CNC, seperti yang juga dicatat oleh Nguyen serta Park dan Lee [33], [39].

Dari segi integrasi antara Inkscape dan GRBL, hasil pengujian menunjukkan bahwa kesesuaian bentuk antara desain digital dan hasil yang dihasilkan sangat tergantung pada kualitas konversi G-code serta cara firmware GRBL memahami dan mengeksekusi jalur tersebut. Dalam pola geometris sederhana, bentuknya relatif cocok dengan deviasi yang kecil, tetapi pada pola yang kompleks dengan banyak bagian kurva dan perubahan arah yang tajam, mulai muncul penumpukan kesalahan lintasan yang memengaruhi penurunan ketajaman dan akurasi lokal. Fenomena ini sesuai dengan analisis Lee dan Kim serta Verma dan Mehta yang menunjukkan bahwa keterbatasan resolusi interpolasi dan kecepatan stepper motor dalam

sistem GRBL dapat memengaruhi presisi jalur pada desain yang rumit [9], [19]. Namun, secara umum, integrasi antara Inkscape dan GRBL tetap menunjukkan hasil yang cukup baik sebagai solusi open-source untuk aplikasi menggambar dengan robot dan pengukir laser skala desktop, seperti yang juga ditunjukkan dalam penelitian Dewi et al. dan Pratama et al. [10], [40].

Variasi dimensi yang cukup kecil terjadi pada bentuk yang sama, terutama pada bahan akrilik dan karton. Nilai standar deviasi hasil pengukuran material tersebut berada dalam rentang yang sama dengan penelitian Sahu dan Panda serta Rahman dan Islam, yang menekankan bahwa kemampuan ulang pengukuran sistem CNC laser sangat bergantung pada stabilitas mekanik dan kontrol gerakan [28], [38]. Pada bahan kayu lapis dan MDF, pola yang dihasilkan cenderung tidak konsisten karena perbedaan di dalam bahan itu sendiri, meskipun parameter proses dan desain tetap dipertahankan. Ini menunjukkan bahwa ketidaksesuaian pada material tertentu lebih dipengaruhi oleh sifat alami material itu sendiri, bukan karena masalah dari sistem mesin.

Analisis perbandingan antara berbagai bahan menunjukkan bahwa tidak ada satu kombinasi parameter proses yang terbaik untuk semua jenis bahan non-logam. Setiap bahan membutuhkan penyesuaian parameter tertentu agar bisa mencapai keseimbangan antara ketelitian ukuran, kejernihan garis, dan keseragaman pola. Temuan ini mendukung pendekatan optimisasi multi-parameter dan multi-objective yang sering diusulkan dalam literatur tentang penggeraman laser modern [7], [22], [29]. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan manfaat nyata berupa rekomendasi parameter proses yang didasarkan pada karakteristik material, sekaligus memperdalam pemahaman akademik tentang hubungan antara desain digital, sistem kontrol GRBL, dan proses pengukiran laser.

Dari sudut pandang sistem manufaktur digital, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mesin penggambar robot hybrid laser berbasis integrasi Inkscape-GRBL memiliki kemampuan yang sangat baik sebagai alat pembelajaran, pengembangan ide, dan produksi sederhana dengan biaya yang tidak terlalu tinggi. Kinerja mesin dalam membuat pola dengan tingkat akurasi dan konsistensi yang cukup baik menunjukkan bahwa sistem open-source bisa menjadi pilihan yang layak dibandingkan mesin

komersial yang harganya mahal, terutama untuk aplikasi yang tidak melibatkan bahan logam. Temuan ini sesuai dengan laporan Sneineh, Milah, dan Prabowo yang menekankan kemungkinan penggunaan sistem CNC open-source dalam bidang industri kecil dan pendidikan teknik [14], [26].

Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan ini menunjukkan bahwa kualitas hasil kerja mesin robot drawing hybrid laser merupakan hasil dari interaksi yang rumit antara berbagai parameter proses, sifat bahan yang digunakan, serta kemampuan sistem kontrolnya. Penilaian yang berlandaskan akurasi ukuran, kesamaan garis, dan kekonsistenan pola memberikan kerangka analisis yang lengkap untuk mengevaluasi kinerja mesin secara objektif dan terukur. Dengan menghubungkan hasil eksperimen dengan penemuan dari penelitian terbaru, penelitian ini tidak hanya memperkuat temuan sebelumnya, tetapi juga membuka wawasan baru mengenai kemampuan sistem mesin CNC laser yang menggunakan perangkat lunak open-source dalam memproses bahan non-logam [22], [36], [40].

IV. Kesimpulan

Mesin robot drawing hybrid laser yang menggunakan integrasi Inkscape-GRBL menunjukkan hasil yang cukup baik dalam proses menggambar dan ukir laser pada bahan non-logam, dengan kualitas hasilnya sangat dipengaruhi oleh jenis bahan dan parameter proses yang digunakan. Material homogen seperti akrilik memberikan hasil yang paling akurat dalam ukuran dan pola yang konsisten, sedangkan material berbasis serat cenderung menunjukkan variasi yang lebih besar karena sifat termal dan strukturalnya. Perubahan kecepatan gerak dan kekuatan laser secara langsung memengaruhi ketajaman garis dan presisi bentuk geometri, sehingga diperlukan pengaturan parameter yang tepat untuk setiap jenis material. Penggunaan Inkscape bersama GRBL dapat menghasilkan ketelitian dan konsistensi yang cukup baik dalam bentuk geometris, tetapi masih kurang efektif untuk desain yang sangat rumit. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengoptimalkan parameter dan meningkatkan akurasi sistem gerak.

Daftar pustaka

- F. Azmi, R. Siregar, dan H. S. Tambunan, "Design and development of a 3-axis CNC engraving machine based on Arduino and GRBL," *J. Electrical Systems and Control Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2020.
- S. R. Suresh, P. K. Sahu, and R. K. Panda, "Design and implementation of a low-cost CNC plotter using open-source software," *Int. J. Research in Engineering and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 45–51, 2020.
- M. A. Rahman, M. M. Islam, and A. K. M. S. Islam, "Performance evaluation of CNC laser engraving on non-metallic materials," *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, pp. 1221–1227, 2021.
- R. Singh and A. Kumar, "Experimental investigation of laser engraving parameters on wood and acrylic materials," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64, pp. 527–535, 2021.
- A. Anrinal, F. A. Pratama, dan A. Yanto, "Effect of laser power and feed rate on engraving quality of CNC laser machine," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 89–97, 2021.
- J. P. Davim, *Laser Machining of Advanced Materials*, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2021.
- K. Patel and S. Shah, "Optimization of CNC laser engraving parameters for dimensional accuracy," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 115, no. 9–10, pp. 2987–2998, 2021.
- M. K. Gupta, P. K. Sood, and S. Sharma, "Recent advances in laser-based manufacturing of polymeric materials," *Polymers*, vol. 13, no. 22, pp. 1–22, 2021.
- A. S. Verma and N. K. Mehta, "Analysis of motion control accuracy in GRBL-based CNC systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 156231–156240, 2021.
- D. Y. Dewi, I. Guntara, dan R. Trisudarmo, "Development of CNC drawing machine using Inkscape and GRBL firmware," *Uranus: Journal of Electrical Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 129–142, 2024.
- A. Y. Zamhari, A. Anrinal, dan M. Fadherizal, "Firmware tuning effects on engraving precision of CNC laser machines," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 55–63, 2022.
- T. Nguyen and H. Pham, "Influence of laser scanning speed on engraving quality of polymer materials," *Optics & Laser Technology*, vol. 145, pp. 107–114, 2022.
- S. Rout, A. Panda, and S. K. Sahoo, "Surface quality assessment in laser engraving of non-metal materials," *Surface Topography: Metrology and Properties*, vol. 10, no. 2, 2022.
- A. Sneineh, "Development and evaluation of a low-cost CNC engraving machine," *Journal of Robotics and Control*, vol. 3, no. 4, pp. 412–420, 2022.
- J. Fan, E. P. D. Boangmanalu, and A. B. Pratama, "Dimensional accuracy analysis of CNC laser engraving on acrylic materials," *Machine: Journal of Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 75–83, 2022.
- M. P. Dua, "Arduino-based CNC plotter machine for precision drawing applications," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 70, no. 5, pp. 241–247, 2022.
- A. K. Dubey and V. Yadava, "Laser beam machining—A review," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 164, 2022.
- P. Kumar and R. Singh, "Experimental study on laser engraving quality of MDF boards," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 2034–2040, 2022.
- S. H. Lee and J. H. Kim, "G-code interpretation accuracy in open-source CNC controllers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 8, pp. 8121–8129, 2022.
- R. Tjahyono, "Optimization of laser engraving parameters for acrylic materials," *Journal of Industrial Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 145–153, 2023.
- A. Anrinal, M. Fadherizal, dan A. Yanto, "Performance testing of CNC laser engraver on plywood media," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2023.
- C. Y. Lee, C. M. Wang, and J. X. Jian, "Multi-objective optimization of laser engraving parameters using genetic algorithms," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 18, 2023.
- A. Kumar, S. Singh, and P. Verma, "Evaluation of dimensional deviation in laser engraving processes," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 68, pp. 115–123, 2023.
- H. Zhang and Y. Liu, "Accuracy improvement in CNC laser engraving through motion control optimization," *Precision Engineering*, vol. 79, pp. 45–54, 2023.
- M. S. Hossain et al., "Effect of material properties on laser engraving quality," *Optics & Laser Engineering*, vol. 163, 2023.

- A. Milah and R. Prabowo, "Design and analysis of GRBL-based CNC milling and engraving systems," *Journal of Mechanical Engineering Research*, vol. 15, no. 2, pp. 89–98, 2023.
- J. Liu, "Laser engraving performance evaluation on polymer materials," *Polymers*, vol. 15, no. 3, 2023.
- S. K. Sahu and A. K. Panda, "Repeatability and consistency analysis of CNC laser engraving," *Measurement*, vol. 214, 2023.
- R. Ghozali, "Effect of cutting speed and laser power on engraving accuracy," *Processes*, vol. 11, no. 6, 2023.
- A. Gupta and N. Sharma, "Quality assessment of laser engraved patterns using image processing," *Measurement Science and Technology*, vol. 34, no. 9, 2023.
- A. Ramadhan, M. Rasyid, dan A. Fadli, "Optimization of CNC laser cutting accuracy on acrylic materials," *Machinery: Journal of Applied Mechanical Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 38–47, 2025.
- J. Zhou and K. Wang, "Dimensional accuracy prediction in laser engraving using statistical models," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 92, pp. 112–120, 2024.
- S. Park and J. Lee, "Evaluation of line sharpness in laser engraving applications," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 165, 2024.
- A. Anrinal and A. Yanto, "Influence of firmware configuration on laser engraving quality," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 14, no. 1, pp. 23–31, 2024.
- M. K. Gupta and J. P. Davim, "Recent trends in laser-based manufacturing of non-metallic materials," *Materials*, vol. 17, no. 4, 2024.
- T. Kurniawan et al., "Performance evaluation of hybrid CNC drawing and laser machines," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, pp. 331–342, 2024.
- H. Wang et al., "Motion accuracy analysis of desktop CNC machines using GRBL controller," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 45678–45687, 2024.
- S. Rahman and M. Islam, "Assessment of pattern consistency in laser engraving processes," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 1, 2024.
- C. Nguyen, "Effect of design resolution on CNC laser engraving quality," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 914, pp. 102–109, 2024.
- A. Y. Pratama, I. Guntara, dan D. Y. Dewi, "Experimental evaluation of CNC robot drawing hybrid laser using Inkscape–GRBL integration," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 76, pp. 210–219, 2025.