

Tinjauan Penggerudian Laser: Kemajuan, Teknik Optimasi, dan Aplikasi

Abdul Haris Nasution^{1*}, & Armansyah Ginting²¹⁾ Prodi. Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Islam Sumatera Utara, Medan.²⁾ Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara, Medan.

*Email: aharisnst@ft.uisu.ac.id

ABSTRACT

This review paper presents a comprehensive analysis of laser drilling technologies, focusing on recent advancements, optimization techniques, and industrial applications. Laser drilling has emerged as a crucial non-conventional machining process for creating precise micro-holes in various materials, including composites, metals, ceramics, and silicon. The paper examines multiple aspects of laser drilling processes, including different laser types (CO₂, Nd:YAG, fiber, femtosecond), optimization methodologies, and parameter influences on output quality characteristics. Special attention is given to challenges in drilling complex materials like Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) composites, titanium alloys, stainless steel, and ceramic matrix composites. The review highlights optimization approaches such as Response Surface Methodology (RSM), Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA), and various metaheuristic algorithms including grey wolf optimizer. The paper also explores emerging techniques like water-assisted laser drilling, vector laser drilling, and laser-layered scanning that address limitations in conventional processes. Environmental and sustainability aspects are discussed, with emphasis on energy efficiency and reduced material waste. This review aims to provide researchers and industry practitioners with a comprehensive understanding of current laser drilling technologies, while identifying future research directions toward more efficient, sustainable, and high-quality laser drilling processes.

Keywords : Laser Drilling, Advancements, Optimization, Applications

PENDAHULUAN

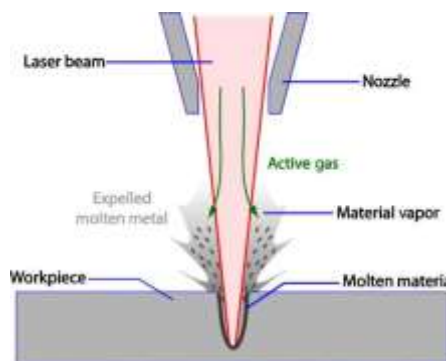
Penggerudian laser telah menjadi proses pemesinan nonkonvensional yang penting dalam manufaktur modern, menawarkan keuntungan unik dalam menciptakan lubang mikro yang presisi dan fitur dalam material yang sulit dikerjakan. Teknologi ini telah berkembang secara signifikan sejak awal, dengan peningkatan berkelanjutan dalam sumber laser, sistem pengiriman sinar, dan parameter proses, yang memungkinkan aplikasi di berbagai industri termasuk sektor kedirgantaraan, otomotif, elektronik, dan medis.[1]

Meningkatnya permintaan untuk komponen miniatur dengan lubang mikro mulai dari beberapa mikron hingga ratusan mikron telah memposisikan penggerudian sinar laser (LBD) sebagai opsi yang layak dan sering kali lebih disukai dalam lingkungan manufaktur saat ini (Pendokhare & Chakraborty). Preferensi ini berasal dari sifat pemrosesan laser yang nonkontak, yang menghilangkan keausan alat mekanis dan memungkinkan pemesinan material keras dan getas dengan presisi tinggi[2]. Selain itu, penggerudian laser menawarkan keuntungan dalam hal kecepatan pemrosesan, fleksibilitas[3], dan kemampuan untuk membuat fitur dengan rasio aspek tinggi yang akan menjadi tantangan atau tidak mungkin dilakukan dengan metode penggerudian konvensional[4].

Penggerudian material seperti komposit Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) melalui metode konvensional [5] sering kali menyebabkan delaminasi dan lancip, yang menyebabkan hilangnya kualitas dan ketidaktepatan (Mahesh & Kandasamy). Demikian pula, metode pemesinan mekanis tradisional terbukti tidak memadai untuk memenuhi persyaratan yang semakin ketat untuk memproses kualitas pada material seperti silikon [6] (Wang & Yang). Keterbatasan ini telah mendorong pengembangan dan penyempurnaan teknologi penggerudian laser yang disesuaikan dengan material dan aplikasi tertentu [7].

Makalah tinjauan ini bertujuan untuk memberikan analisis komprehensif tentang kemajuan terkini dalam teknologi penggerudian laser, teknik pengoptimalan, dan aplikasi di berbagai material dan industri [8]. Makalah ini merangkum temuan dari berbagai studi penelitian untuk menyajikan

◆ pandangan holistik tentang kondisi terkini teknologi penggerudian laser, termasuk: →



Gambar 1. Proses penggerudian laser

Berbagai jenis laser yang digunakan dalam operasi penggerudian dan aplikasinya, Parameter proses yang memengaruhi kualitas dan efisiensi penggerudian, Teknik pengoptimalan untuk meningkatkan kinerja penggerudian, Tantangan dan solusi dalam penggerudian berbagai material, Teknologi baru dan pendekatan hibrida dalam penggerudian laser, Aspek keberlanjutan dan pertimbangan efisiensi energi [9].

Dengan memeriksa aspek-aspek ini, tinjauan ini berupaya memberikan wawasan berharga bagi para peneliti, insinyur, dan praktisi industri yang bekerja dengan teknologi penggerudian laser, sekaligus mengidentifikasi arah yang menjanjikan untuk penelitian dan pengembangan masa depan di bidang ini.

METODE

Metode dalam studi ini berupa tinjauan literatur (systematic review) yang dilakukan untuk menganalisis secara komprehensif teknologi penggerudian laser (laser drilling), mencakup kemajuan terbaru, teknik optimasi, serta penerapannya dalam industri. Survei literatur dilakukan melalui pencarian data sekunder dari berbagai basis data ilmiah terkemuka seperti “Scopus”, “Web of Science”, “IEEE Xplore”, dan “ScienceDirect” selama periode Januari 2015 hingga Desember 2024..

Waktu dan Tempat

Kegiatan peninjauan dilakukan secara daring (online) pada bulan Maret hingga Juni 2025, bertempat di Laboratorium Pemesinan Non-Konvensional, Departemen Teknik Mesin, Universitas Islam Sumatera Utara

Kriteria dan Teknik Pengumpulan Data

Pemilihan artikel didasarkan pada kriteria inklusi sebagai berikut: Artikel berbahasa Inggris

Fokus pada topik penggerudian laser

Mengandung data tentang parameter proses, kualitas hasil (misalnya taper, HAZ, diameter), dan teknik optimasi

Dipublikasikan dalam jurnal peer-reviewed

Artikel ditelusuri menggunakan kata kunci seperti: “laser drilling”, “non-traditional machining”, “laser parameters optimization”, “femtosecond drilling”, “water-assisted laser”*, dan lain-lain. Total terdapat “75 artikel utama” yang digunakan sebagai sumber data setelah proses penyaringan awal (title, abstract, dan keyword) serta telaah isi penuh.

Bahan dan Alat

Tidak digunakan bahan fisik karena metode bersifat studi literatur. Alat yang digunakan berupa

perangkat lunak pendukung analisis dan manajemen referensi, yaitu:

- Mendeley dan Zotero (manajemen referensi)
- NVivo untuk pengkodean tematik data literature
- Excel dan OriginPro untuk visualisasi tren dan grafik komparatif

Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara kualitatif dan kuantitatif. Secara kualitatif, dilakukan analisis konten terhadap jenis laser (CO₂, Nd:YAG, fiber, femtosecond), metode drilling (single-pulse, trepanning, helical), serta teknik inovatif seperti “vector scanning” dan “water-assisted laser drilling”.

Untuk aspek kuantitatif, dilakukan tabulasi komparatif parameter proses seperti daya laser, waktu paparan, kecepatan pemotongan, dan fokus lensa terhadap karakteristik hasil seperti taper, lebar HAZ, dan diameter lubang. Teknik optimasi seperti “Response Surface Methodology (RSM)”, “Multi- Objective Genetic Algorithm (MOGA)”, serta algoritma metaheuristik (“Grey Wolf Optimizer”, “Particle Swarm Optimization”) dianalisis berdasarkan efektivitasnya dalam mengurangi cacat hasil dan meningkatkan efisiensi energi.

Validasi dan Sintesis

Validitas data ditingkatkan dengan triangulasi sumber, yaitu membandingkan temuan dari beberapa artikel yang membahas objek, parameter, dan metode serupa. Seluruh data kemudian disintesis untuk menyusun tren perkembangan teknologi penggerudian laser dan mengidentifikasi arah riset masa depan dalam aspek efisiensi, keberlanjutan, dan kualitas hasil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Teknologi dan Parameter Pengeboran Laser

Jenis Laser dan Aplikasinya;

Berbagai jenis laser digunakan dalam aplikasi pengeboran, masing-masing memiliki karakteristik berbeda yang membuatnya cocok untuk material dan persyaratan tertentu:[10]

Laser CO₂

Laser CO₂, yang beroperasi pada panjang gelombang 10,6 μm, telah digunakan secara luas untuk operasi penggerudian pada material seperti komposit GFRP. Mahesh & Kandasamy menyelidiki optimalisasi parameter proses penggerudian laser CO₂ untuk komposit serbuk S-kaca/Al₂O₃/Perlite hibrida guna mengurangi delaminasi dan keruncingan, yang merupakan masalah umum dalam metode penggerudian konvensional. Laser CO₂ khususnya efektif untuk memproses material organik dan komposit karena karakteristik penyerapannya yang kuat pada panjang gelombang inframerah.

Laser Nd:YAG

Laser Nd:YAG, dengan panjang gelombang 1064 nm, dapat diaplikasikan pada penggerudian material dengan reflektivitas yang lebih tinggi seperti logam. Chatterjee dkk. melakukan penyelidikan eksperimental pada karakteristik kualitas dalam penggerudian laser Nd:YAG pada baja tahan karat (AISI 316) [11], dengan fokus pada pengendapan percikan dan pembentukan zona yang terpengaruh panas (HAZ). Studi mereka mengungkapkan bahwa lebar pulsa merupakan parameter paling signifikan yang memengaruhi kedua ukuran kinerja, dengan lebar pulsa yang lebih tinggi mengakibatkan peningkatan HAZ karena masukan termal yang lebih besar.

Fiber Lasers

Laser serat telah menjadi terkenal karena daya tinggi, kualitas sinar yang sangat baik, dan efisiensinya. Mah dkk. menyelidiki pemotongan dan penggerudian es menggunakan laser serat terdoping Yb yang memancarkan pada 1070 nm, menunjukkan hubungan linier antara durasi pulsa dan kedalaman pemotongan. Studi ini menyoroti keuntungan pulsa yang lebih pendek dalam efisiensi pemotongan slot dan meminimalkan perubahan pada material di sekitarnya [12].

Laser Femtodetik

Laser femtodetik pulsa ultra-pendek menawarkan keuntungan dalam hal zona yang terpengaruh panas minimal dan presisi tinggi. Fan dkk. mengevaluasi penggerudian laser femtodetik terpolarisasi radial pada lubang pendingin film, menemukan bahwa laser terpolarisasi radial menunjukkan efisiensi penetrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan laser terpolarisasi linier, dengan peningkatan hingga 35,2% dalam aplikasi tertentu. Zhang dkk. mengembangkan pendekatan penggerudian laser femtodetik berbantuan air hibrida untuk membuat lubang mikro rasio aspek tinggi dengan sudut lancip rendah, mencapai rasio aspek melebihi dan sudut lancip di bawah $0,1^\circ$. [13]

Parameter Proses Kritis

Kualitas dan efisiensi operasi penggerudian laser dipengaruhi secara signifikan oleh beberapa parameter proses utama:

Daya Laser

Daya laser secara langsung memengaruhi masukan energi ke dalam material dan akibatnya memengaruhi laju penggerudian, zona yang terpengaruh panas, dan kualitas keseluruhan. Muthuramalingam dkk. menemukan bahwa daya laser memiliki dampak paling signifikan pada akurasi dimensi dan ukuran kualitas permukaan saat mengebor paduan titanium. Studi mereka mengidentifikasi pengaturan daya optimal 2-3 kW tergantung pada metrik kualitas spesifik yang dioptimalkan. [14]

Karakteristik Pulsa

Lebar pulsa, frekuensi, dan energi memainkan peran penting dalam operasi penggerudian laser. Zhang dkk. menyelidiki evolusi dinamis lubang kunci selama penggerudian multi-pulsa dengan laser milidetik pada baja tahan karat 304, mengidentifikasi tiga periode berbeda berdasarkan efisiensi ejeksi: penggerudian cepat, penggerudian linier, dan penggerudian sedang. Studi mereka mengungkapkan bagaimana perilaku aliran lelehan dipengaruhi oleh gaya yang berbeda (tekanan rekoil, tegangan permukaan, gravitasi) selama periode ini. [15]

Panjang Fokus dan Posisi

Panjang fokus dan posisi memengaruhi kepadatan energi di permukaan benda kerja secara signifikan. Xu dkk. menyoroti pengaruh penting penyesuaian peningkatan fokus dalam proses pemindaian berlapis laser untuk memotong komposit matriks keramik SiCf/SiC. Studi mereka menunjukkan bahwa mengoptimalkan peningkatan fokus mempertahankan laju penghilangan material yang tinggi dan stabil di seluruh proses sekaligus mengurangi oksidasi permukaan dan meminimalkan pembentukan lapisan cor ulang.

Gas Pembantu dan Tekanan

Gas pembantu membantu menghilangkan material cair dan melindungi optik. Pendokhare & Chakraborty memasukkan tekanan gas sebagai parameter penting dalam pengoptimalan penggerudian mikro pada baja tahan karat, di samping arus, kecepatan pemotongan, dan frekuensi pulsa, dengan kebulatan dan sudut lancip sebagai variabel respons.

Pertimbangan Khusus Material

Material yang berbeda menghadirkan tantangan dan persyaratan unik untuk penggerudian laser:

Komposit

GFRP dan material komposit lainnya rentan terhadap delaminasi, degradasi matriks, dan penarikan serat selama penggerudian. Studi pengoptimalan Mahesh & Kandasamy untuk penggerudian laser CO₂ pada komposit GFRP/Al₂O₃/perlite bertujuan untuk meminimalkan masalah ini melalui pemilihan parameter dan pengoptimalan yang cermat menggunakan teknik RSM dan MOGA.

Logam dan Paduan

Logam seperti paduan titanium dan baja tahan karat memerlukan pertimbangan faktor-faktor seperti oksidasi, pembentukan percikan, dan zona yang terpengaruh panas. Studi Muthuramalingam dkk. pada paduan titanium (Ti-6Al-4V) mengidentifikasi kombinasi optimal jarak nosel, daya, panjang fokus, dan tekanan gas untuk meningkatkan akurasi dimensi dan kualitas permukaan.

Silikon dan Keramik

Material keras dan getas mendapat manfaat dari sifat non-kontak penggerudian laser. Ulasan Wang & Yang tentang penggerudian laser silikon mengkategorikan teknik berdasarkan lebar pulsa (nanodetik, pikosekon, femtodetik) dan membahas pendekatan khusus seperti penggerudian dengan bantuan cairan dan pemotongan perambatan retak termal yang diinduksi laser.

Optimization Techniques in Laser Drilling

Desain Eksperimen dan Metode Statistik

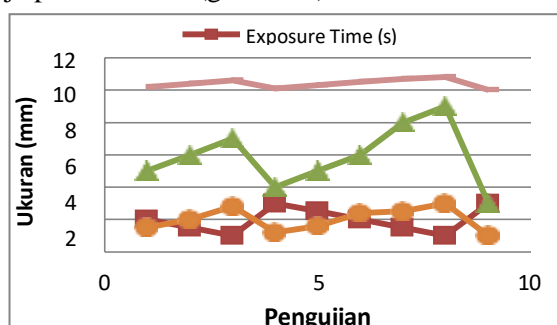
Pendekatan desain eksperimen sistematis telah banyak digunakan untuk mengoptimalkan proses penggerudian laser[16]:

Metodologi Permukaan Respons (RSM)

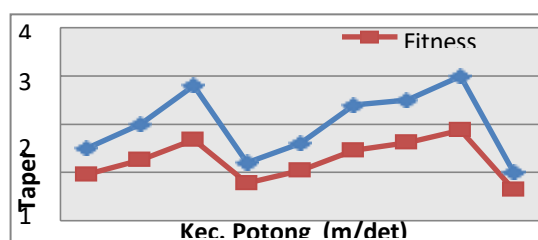
RSM telah terbukti efektif dalam pemodelan dan pengoptimalan parameter penggerudian laser. Mahesh & Kandasamy menggunakan RSM bersama Algoritma Genetika Multi-Objektif untuk mengoptimalkan penggerudian laser CO₂ pada komposit GFRP, dengan fokus pada meminimalkan delaminasi lubang dan keruncingan (*tapers*). Pendekatan pemodelan matematika mereka mencapai deviasi kurang dari 3% dari tujuan untuk faktor keluaran kritis (*critical output*).

Metode Taguchi dan Analisis Relasional Grey

Metode Taguchi, yang sering dikombinasikan dengan Analisis Relasional Grey, memberikan pendekatan yang kuat terhadap optimasi dengan eksperimen yang minimal. Muthuramalingam dkk. menggunakan pendekatan relasional Taguchi-Grey untuk menganalisis efek parameter proses pada ukuran kinerja permukaan saat mengerjakan paduan titanium. Singh dkk. menggunakan metode Grey Taguchi dengan larik ortogonal L27 untuk menilai efek parameter pengerjaan (kecepatan spindel, laju umpan, dan sudut titik) pada kekasaran permukaan dan akurasi diameter lubang dalam penggerudian baja paduan EN-3 (gambar 2).



Gambar 2. Pemesinan laser baja tahan karat



Gambar 3. Grafik 3D berdasarkan Analisis RSM:

Pada gambar 3 nilai Taper cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan pemotongan dari 5 hingga 7 m/s, kemudian menurun drastis pada 4 m/s. Kemudian meningkat lagi hingga 9 m/s dan menurun tajam pada 3 m/s. Interpretasi: Taper sangat dipengaruhi oleh kecepatan pemotongan, dan menunjukkan bahwa ada nilai kecepatan optimal yang menghasilkan taper minimum (sekitar 4 m/s dan 3 m/s). Nilai *Fitness values* juga menunjukkan fluktuasi, tetapi lebih stabil daripada Taper. Kebugaran menurun pada kecepatan pemotongan rendah (3 m/s) dan mencapai puncaknya pada 7 dan 9 m/s. Interpretasi: Kecepatan pemotongan yang lebih tinggi cenderung meningkatkan nilai *Fitness values*, meskipun tidak secara linier.

Algoritma Optimasi Metaheuristik

Algoritma optimasi tingkat lanjut semakin banyak diterapkan pada pemilihan parameter penggerudian laser:

Algoritma Genetika

Algoritma genetika, khususnya Algoritma Genetika Multi-Objektif (MOGA), telah digunakan untuk mengoptimalkan beberapa tujuan secara bersamaan. Karya Mahesh & Kandasamy menunjukkan keefektifan MOGA dalam mengoptimalkan daya laser, kecepatan pemotongan, dan panjang fokus untuk meminimalkan delaminasi dan kerucingan pada komposit GFRP.

Algoritma Berbasis Perilaku Memangsa

Pendokhare & Chakraborty melakukan analisis komparatif terhadap lima algoritma metaheuristik berbasis perilaku memangsa: pengoptimal ikan layar, pengoptimal elang Harris, pengoptimal Aquila, pengoptimal kelelawar, dan pengoptimal serigala abu-abu. Studi mereka memvalidasi algoritma ini untuk mengoptimalkan penggerudian mikro berbasis laser CO₂ pada polikarbonat dan penggerudian mikro pada baja tahan karat. Pengoptimal serigala abu-abu muncul sebagai algoritma paling efisien berdasarkan kualitas solusi, kecepatan konvergensi, dan upaya komputasi, sebuah temuan yang didukung oleh uji peringkat rata-rata Friedman.[2]

Optimalisasi Bayesian

Yang dkk. memperkenalkan optimalisasi Bayesian (BO) untuk mengatasi tantangan optimalisasi multidimensi dalam penggerudian laser. Studi mereka tentang penggerudian spiral laser gelombang kuasi-kontinu pada baja tahan karat secara bersamaan mengoptimalkan kemiringan lubang bor dan waktu pemrosesan relatif terhadap empat parameter pemrosesan. BO menunjukkan efektivitas dalam mengoptimalkan dalam ruang parameter empat dimensi, dengan kemampuan untuk menyeimbangkan keseimbangan antara kualitas dan efisiensi penggerudian melalui fungsi tujuan yang disesuaikan. Dengan menggunakan fungsi tujuan berorientasi kualitas, kemiringan lubang ditingkatkan dari 4,3° menjadi 0,8° hanya dalam 20 iterasi, sementara fungsi berorientasi efisiensi mengurangi waktu pemrosesan dari 13,5 detik menjadi 1,6 detik.[3]

Pemodelan dan Simulasi Fisik

Model komputasional memberikan wawasan tentang proses penggerudian laser dan membantu optimalisasi:

Model Aliran Multifase

Jiao dkk. mengembangkan model aliran multifase transien tiga dimensi untuk mensimulasikan penggerudian laser berpemandu jet air pada baja tahan karat 304. Model mereka memperhitungkan proses peleburan dan penguapan, perpindahan panas, transisi fase, dan aliran fluida selama penggerudian, memberikan wawasan tentang evolusi morfologi lubang dan mekanisme pembentukan lapisan cor ulang.[11]

Simulasi Dinamika Lubang Kunci

Zhang dkk. menyelidiki dinamika lubang kunci selama penggerudian multi-pulsa dengan laser milidetik melalui observasi in-situ dan simulasi numerik. Studi mereka mengidentifikasi tiga periode penggerudian yang berbeda berdasarkan efisiensi eaksi dan mengkarakterisasi perilaku

aliran lelehan yang dipengaruhi oleh tekanan rekoil, tegangan permukaan, dan gravitasi selama berbagai tahap proses [8].

Teknik Lanjutan dan Pendekatan Hibrida

Penggerudian Laser Berbantuan Air

Integrasi air dengan penggerudian laser telah menghasilkan peningkatan kualitas yang signifikan:

Laser Berpanduan Jet Air

Simulasi model aliran multifase Jiao dkk. menguji penggerudian laser berpemandu jet air (WJGL) pada baja tahan karat 304. Teknik ini menggunakan air sebagai pemandu gelombang untuk sinar laser, yang menawarkan keuntungan dalam presisi dan mengurangi kerusakan termal. Model mereka adalah yang pertama mencapai efek gabungan laser dan jet air pada substrat, yang memberikan wawasan tentang efek parameter pemrosesan pada morfologi lubang [11].

Pendekatan Hibrida Berbantuan Air

Zhang dkk. mengembangkan pendekatan hibrida inovatif yang disebut penggerudian laser femtodetik dengan semprotan air dan aliran air dari belakang (SWF-BFWA). Metode ini menggabungkan efisiensi pemrosesan tinggi dan kemampuan rasio aspek yang unggul dari semprotan

Air dengan presisi geometri yang sangat baik dan karakteristik lancip minimal dari aliran air dari belakang. Strategi pemrosesan berurutan mereka menghasilkan lubang mikro dengan rasio aspek melebihi 12:1 dan sudut lancip di bawah $0,1^\circ$ [8].

Pemesinan Laser Berbantuan Getaran Ultrasonik

Kang dkk. mengusulkan perangkat pemesinan laser berbantuan getaran ultrasonik lensa baru yang menerapkan getaran ultrasonik ke lensa, meningkatkan kualitas pemrosesan sekaligus mempertahankan fleksibilitas pemrosesan laser. Desain mereka mencapai amplitudo maksimum 30 μm pada permukaan ujung lensa pada frekuensi resonansi 29703 Hz. Teknik ini menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan kualitas permukaan selama pemrosesan laser dan mengurangi sudut tirus dalam penggerudian laser dengan mengubah kepadatan energi laser melalui penyesuaian diameter titik. [16]

Efek Laser Vektor dan Polarisasi

Fan dkk. menyelidiki ketergantungan polarisasi dalam penggerudian laser femtodetik, menemukan bahwa laser terpolarisasi radial menunjukkan efisiensi penetrasi tertinggi dalam penggerudian dalam. Hasil mereka menunjukkan peningkatan efisiensi penetrasi sebesar 35,2% dan 33,0% dibandingkan dengan laser terpolarisasi linier pada sampel setebal 3 mm dan 5 mm. Kombinasi spektroskopi serapan transien ultrcepat dan spektroskopi kerusakan yang diinduksi laser mengonfirmasi bahwa laser terpolarisasi radial menunjukkan daya serap dan efisiensi ablasi yang lebih tinggi. [13]

Teknik Pemindaian Berlapis Multigaris

Xu dkk. mengembangkan metode pemotongan berkualitas tinggi yang efisien untuk komposit matriks keramik SiCf/SiC tebal menggunakan pemindaian berlapis multigaris laser UV dengan pengoptimalan peningkatan fokus. Pendekatan mereka menyoroti pengaruh penting penyesuaian peningkatan fokus dalam proses pemindaian berlapis laser dan menunjukkan hubungan antara penurunan fokus laser yang telah ditentukan per lapisan dan kedalaman ablasi aktual. Teknik ini mencapai luas permukaan $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (Sa 366,92 nm) hanya dalam 117,58 detik, mempertahankan tingkat penghilangan material yang tinggi dan stabil sepanjang proses sambil mengurangi oksidasi permukaan dan meminimalkan pembentukan lapisan cor ulang. [6]

Aplikasi dan Arah Masa Depan

Aplikasi Khusus Industri, Dirgantara dan Penerbangan, Penggerudian laser memiliki aplikasi penting dalam komponen dirgantara, khususnya dalam pembuatan lubang pendingin pada bilah

turbin dan ruang pembakaran. Karya Fan dkk. tentang penggerudian laser femtodetik terpolarisasi radial pada lubang pendingin film membahas aplikasi ini, sementara teknik Xu dkk. untuk memproses komposit matriks keramik SiCf/SiC relevan untuk komponen termal dirgantara generasi berikutnya.

Elektronik dan Semikonduktor

Ulasan Wang & Yang tentang penggerudian dan pemotongan silikon dengan laser menyoroti aplikasi dalam manufaktur semikonduktor. Pembahasan mereka tentang pemotongan laser secara diam- diam sebagai metode yang menjanjikan untuk pemotongan wafer menunjukkan relevansi teknologi dalam produksi elektronik.[7]

Perangkat Medis

Lubang mikro presisi yang dibuat dengan penggerudian laser sangat penting dalam perangkat medis seperti peralatan bedah, implan, dan sistem pengiriman obat. Kemampuan untuk menciptakan fitur yang bersih dan presisi dalam bahan yang biokompatibel membuat penggerudian laser berharga di sektor ini.

Industri Otomotif

Penggerudian laser digunakan dalam nosel injeksi bahan bakar, filter, dan komponen otomotif lainnya yang memerlukan fitur mikro yang presisi. Meningkatnya permintaan akan bahan ringan dalam aplikasi otomotif, termasuk komposit dan paduan berkekuatan tinggi, sejalan dengan kemampuan penggerudian laser untuk memproses bahan-bahan ini.

Aplikasi yang Muncul, Mesin Bor Terowongan

Zhang dkk. melakukan studi kelayakan kepala pemotong laser daya yang dapat disesuaikan untuk aplikasi mesin bor terowongan (TBM), dengan fokus pada efisiensi fragmentasi batuan dan konsumsi energi. Penelitian mereka meliputi pembuatan model teoretis laser, perancangan prototipe kepala pemotong laser, dan usulan mode pemecah batuan berbantuan laser. Pendekatan laser terdistribusi menunjukkan pengurangan konsumsi energi yang signifikan selama penetrasi batu, menawarkan keuntungan dalam efek pemecahan batu dan efisiensi operasional.[8]

Penggerudian Es

Penelitian Mah dkk. tentang pemotongan es menggunakan laser serat yang didoping Yb menunjukkan aplikasi potensial dalam studi glasiologi dan paleoklimat. Temuan mereka tentang hubungan antara durasi pulsa dan kedalaman pemotongan, serta keuntungan dari pulsa yang lebih pendek, memberikan wawasan untuk mengembangkan teknik pengambilan dan pemrosesan sampel es.[9]

Tantangan dan Arah Penelitian Masa Depan, Keberlanjutan dan Efisiensi Energi

Penelitian masa depan harus difokuskan pada peningkatan efisiensi energi dari proses penggerudian laser. Pekerjaan Zhang dkk. tentang laser terdistribusi untuk pemecahan batu menunjukkan pengurangan konsumsi energi yang signifikan, sebuah prinsip yang dapat diterapkan pada aplikasi penggerudian laser lainnya. Mengembangkan sistem laser berdaya rendah dengan kemampuan penggerudian yang setara atau lebih unggul merupakan arah penelitian yang penting.

Pemantauan dan Kontrol Waktu Nyata

Sistem pemantauan canggih dapat meningkatkan kontrol proses dan jaminan kualitas. Penggunaan sistem pemantauan daring oleh Fan et al. untuk melacak waktu penetrasi, dikombinasikan dengan spektroskopi serapan transien ultracepat dan spektroskopi kerusakan yang diinduksi laser, merupakan contoh pendekatan ini. Integrasi kecerdasan buatan dan algoritma pembelajaran mesin dengan sistem pemantauan waktu nyata menawarkan potensi untuk kontrol proses adaptif.

Pemrosesan Multimaterial

Seiring dengan semakin umumnya struktur komposit dan multimaterial, pengembangan teknik

penggerudian laser yang dioptimalkan untuk material kompleks ini merupakan tantangan yang signifikan. Penelitian tentang pemilihan parameter dan pengoptimalan proses untuk kombinasi material tertentu akan sangat berharga untuk memperluas aplikasi penggerudian laser.

Integrasi dengan Manufaktur Digital

Menggabungkan penggerudian laser ke dalam kerangka kerja manufaktur digital, termasuk integrasi dengan sistem CAD/CAM dan platform robotik, akan meningkatkan fleksibilitas dan otomatisasi. Pengembangan antarmuka standar dan protokol kontrol untuk sistem penggerudian laser merupakan area penting untuk pekerjaan di masa mendatang [16].

KESIMPULAN

Tinjauan komprehensif ini telah meneliti status terkini teknologi penggerudian laser, menyoroti kemajuan dalam sumber laser, teknik pengoptimalan proses, dan aplikasi di berbagai industri. Beberapa kesimpulan utama dapat diambil dari penelitian yang disintesis:

Pertama, penggerudian laser menawarkan keuntungan signifikan dibandingkan metode penggerudian konvensional, khususnya untuk material yang sulit dikerjakan seperti komposit, paduan berkekuatan tinggi, dan material rapuh. Sifat pemrosesan laser yang non-kontak menghilangkan keausan alat mekanis dan memungkinkan terciptanya fitur mikro presisi tinggi dengan kerusakan minimal pada material di sekitarnya.

Kedua, pengoptimalan parameter proses tetap penting untuk mencapai karakteristik kualitas yang diinginkan dalam operasi penggerudian laser. Penelitian telah menunjukkan efektivitas berbagai pendekatan pengoptimalan, mulai dari metode statistik seperti Response Surface Methodology dan analisis relasional Taguchi-Grey hingga algoritme metaheuristik tingkat lanjut seperti grey wolf

optimizer dan pengoptimalan Bayesian. Teknik-teknik ini memungkinkan identifikasi kombinasi parameter optimal yang efisien untuk material dan tujuan kualitas tertentu.

Ketiga, teknik hibrida dan canggih yang muncul menawarkan solusi yang menjanjikan untuk keterbatasan penggerudian laser tradisional. Pendekatan berbantuan air, bantuan getaran ultrasonik, implementasi laser vektor, dan teknik pemindaian berlapis multi-garis telah menunjukkan peningkatan dalam kualitas, efisiensi, dan kemampuan penggerudian. Pendekatan ini memperluas jangkauan material dan geometri yang dapat diproses secara efektif menggunakan penggerudian laser.

Keempat, aplikasi penggerudian laser terus berkembang di berbagai industri, dengan penggunaan yang mapan di sektor kedirgantaraan, elektronik, medis, dan otomotif yang dilengkapi dengan aplikasi yang muncul di bidang-bidang seperti penggerudian terowongan dan penggerudian es. Keragaman aplikasi ini menggarisbawahi fleksibilitas dan kemampuan beradaptasi teknologi penggerudian laser.

Terakhir, tantangan berkelanjutan dalam efisiensi energi, pemantauan waktu nyata, pemrosesan multi-material, dan integrasi manufaktur digital menghadirkan peluang untuk penelitian dan pengembangan di masa mendatang. Mengatasi tantangan ini akan semakin meningkatkan kemampuan dan adopsi teknologi penggerudian laser di seluruh sektor manufaktur.

Sebagai kesimpulan, penggerudian laser merupakan teknologi yang matang namun terus berkembang dengan potensi signifikan untuk kemajuan lebih lanjut. Dengan membangun pemahaman mendasar yang disajikan dalam tinjauan ini dan mengatasi tantangan yang teridentifikasi, para peneliti dan praktisi dapat terus memperluas batasan kemungkinan dengan proses penggerudian laser, memungkinkan aplikasi baru dan meningkatkan kinerja pada aplikasi yang sudah ada.


SARAN

1. Pengembangan Sistem Monitoring Real-Time: Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan sistem monitoring real-time berbasis sensor optik, termal, atau AI untuk

- meningkatkan kontrol proses penggerudian laser. Sistem ini akan memungkinkan deteksi dini terhadap cacat, pengaturan otomatis parameter proses, serta peningkatan kualitas dan efisiensi produksi.
2. Eksplorasi Teknik Hybrid Lebih Lanjut: Penggunaan pendekatan hybrid seperti laser-ultrasonic drilling, water-jet assisted laser drilling, dan teknik scanning berlapis (multi-line scanning) perlu terus dikembangkan dan diuji pada material dan geometri yang lebih kompleks. Fokus pada peningkatan kualitas lubang, mengurangi zona terpengaruh panas (HAZ), dan meningkatkan kecepatan proses menjadi prioritas utama.
 3. Optimasi Parameter Menggunakan Algoritma Cerdas: Disarankan untuk melanjutkan penelitian terhadap pemanfaatan algoritma optimasi cerdas seperti Grey Wolf Optimizer, Particle Swarm Optimization (PSO), atau Bayesian Optimization untuk mempercepat proses pencarian parameter optimal pada berbagai jenis material, khususnya material bertumpuk (stacked materials) dan material komposit.
 4. Penelitian pada Pengolahan Multi-Material: Karena tren industri menuju penggunaan material campuran dan berlapis, studi lebih lanjut perlu difokuskan pada pemrosesan multi-material dalam satu siklus penggerudian, termasuk bagaimana parameter laser harus disesuaikan secara dinamis antar lapisan material.
 5. Integrasi ke dalam Sistem Manufaktur Digital (Industry 4.0): Disarankan untuk mengembangkan arsitektur sistem penggerudian laser yang terhubung secara digital dengan platform Industry 4.0, mencakup pemrosesan data besar (big data), digital twin, dan pemeliharaan prediktif (predictive maintenance) guna meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional.
 6. Studi Ekonomi dan Efisiensi Energi: Penelitian lebih lanjut sebaiknya melibatkan analisis keekonomian dan efisiensi energi pada berbagai konfigurasi penggerudian laser, terutama untuk aplikasi skala industri. Hal ini penting untuk menjawab tantangan terkait konsumsi daya dan biaya operasional.
 7. Pengembangan Aplikasi Baru: Dengan semakin luasnya aplikasi laser drilling, peneliti dan praktisi perlu menjajaki potensi penerapan teknologi ini di sektor-sektor baru seperti pertambangan, pertanian presisi, hingga eksplorasi bawah laut dan luar angkasa, yang membutuhkan solusi penggerudian presisi tinggi di lingkungan ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mahesh, G. G., & Kandasamy, J. (2023). Optimization of CO2 laser drilling process parameters of GFRP/Al2O3/perlite composites. VIT University, Vellore, Tamil Nadu, India.
- [2] Pendokhare, D., & Chakraborty, S. (2023). A comparative analysis of preying behavior-based metaheuristic algorithms for optimization of laser beam drilling processes. Department of Production Engineering, Jadavpur University, Kolkata, West Bengal, India.
- [3] Yang, J., Niu, J., Chen, L., Cao, K., Jia, T., & Xu, H. (2023). Tunable simultaneous Bayesian optimization of hole taper and processing time in QCW laser drilling. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai, China.
- [4] Muthuramalingam, T., Moiduddin, K., Akash, R., Krishnan, S., Mian, S. H., Ameen, W., & Alkhalefah, H. (2023). Influence of process parameters on dimensional accuracy of machined Titanium (Ti-6Al-4V) alloy in Laser Beam Machining Process. Department of Mechatronics Engineering, SRM Institute of Science and Technology, Kattankulathur, India.
- [5] Muthuramalingam, T., Akash, R., Krishnan, S., Phan, N. H., Pi, V. N., & Elsheikh, A. H. (2023). Surface quality measures analysis and optimization on machining titanium alloy using CO2 based laser beam drilling process. Department of Mechatronics Engineering, SRM Institute of Science and Technology, India.
- [6] Xu, Z., Jiang, Y., Bai, J., & Qian, L. (2023). An efficient high-quality cutting method for thick SiCf/SiC ceramic matrix composites using UV laser multiline layered scanning with focus increment optimization. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, PR China.

- ◆ 
- [7] Wang, H.-J., & Yang, T. (2023). A review on laser drilling and cutting of silicon. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, China.
 - [8] Zhang, K., Xiao, S., Liu, W., Wang, D., & Zhang, G. (2023). Feasibility study of an adjustable- power laser cutting head for TBM applications: Focus on rock fragmentation efficiency and energy consumption. Engineering Research Center of Complex Tracks Processing Technology and Equipment of Ministry of Education, Xiangtan University, China.
 - [9] Mah, M. L., Kurbatov, A. V., & Talghader, J. J. (2023). Cutting speed and behaviors of ice using Yb-doped fiber laser. Dept. of Electrical & Computer Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA.
 - [10] Singh, P. K., Kumar, K., & Saini, P. (2023). Optimization of surface roughness and hole diameter accuracy in drilling of EN-31 alloy steel – A TGRA based analysis. Dept. of Mech. Engg., Sant Longowal Institute of Engg. & Tech., Longowal, India.
 - [11] Jiao, H., Zhang, G., Huang, P., Lu, C., Huang, Y., Zhou, J., & Long, Y. (2023). A multiphase flow model simulation of water jet-guided laser drilling in 304 stainless steel. School of Mechanical & Electrical Engineering, Guangxi Key Laboratory of Manufacturing Systems and Advanced Manufacturing Technology, Guilin University of Electronic Technology, China.
 - [12] Zhang, Y., He, X., Yu, G., Li, S., Tian, C., Ning, W., & Zhang, Y. (2023). Dynamic evolution of keyhole during multi-pulse drilling with a millisecond laser on 304 stainless steel. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China.
 - [13] Fan, Z., Shen, P., Sun, X., Sun, T., Yi, L., Cui, J., & Mei, X. (2023). Evaluation of radially polarized femtosecond laser drilling of film cooling holes. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China.
 - [14] Chatterjee, S., Mahapatra, S. S., Sahu, A. K., Bhardwaj, V. K., Choubey, A., Upadhyay, B. N., & Bindra, K. S. (2023). Experimental Investigation Of Quality Characteristics In Nd:YAG Laser Drilling Of Stainless Steel (AISI 316). Department of Mechanical Engineering, National institute of Technology, Rourkela, Odisha-India.
 - [15] Zhang, R., Zhang, H., Ke, R., & Wang, X. (2023). Fabrication of high aspect ratio and low taper angle micro-holes utilizing complex water-assisted femtosecond laser drilling. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, China.
 - [16] Kang, D., Zou, P., Wang, W., Xu, J., & Shen, C. (2023). A lens ultrasonic vibration-assisted laser machining system for laser polishing and laser drilling of 304 stainless steel. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, China.