

teknologi yang banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah teknologi pemotongan berbasis sinar laser atau *laser cutting*.

Teknologi *laser cutting* bekerja dengan memanfaatkan energi cahaya berintensitas tinggi yang difokuskan pada permukaan material sehingga mampu melelehkan, menguapkan, atau membakar material secara terkontrol sesuai dengan pola yang telah diprogram. Proses pemotongan ini memungkinkan pencapaian tingkat akurasi yang sangat tinggi, lebar potong (*kerf*) yang kecil, serta kualitas tepi potongan yang halus dan rapi. Selain itu, karena tidak melibatkan kontak mekanis langsung antara alat potong dan benda kerja, risiko keausan alat dapat diminimalkan serta distorsi mekanis pada material dapat dikurangi secara signifikan. Keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan teknologi *laser cutting* sangat efektif untuk pemotongan material dengan bentuk geometris kompleks dan toleransi ketat (Groover 2010b). Oleh karena itu, mesin *laser cutting* banyak diaplikasikan pada berbagai sektor industri, seperti manufaktur logam, otomotif, elektronik, periklanan, hingga bidang rekayasa presisi lainnya.

Selain penggunaannya di sektor industri, mesin *laser cutting* juga memiliki peranan yang sangat penting dalam dunia pendidikan teknik dan rekayasa. Teknologi ini banyak dimanfaatkan sebagai sarana praktikum, pembuatan prototipe, serta pengembangan produk berbasis *digital fabrication*. Melalui penggunaan mesin *laser cutting*, mahasiswa dapat memahami keterkaitan antara proses perancangan digital (*computer aided design*) dengan proses manufaktur secara nyata. (Gershenfeld 2005) menyatakan bahwa penerapan teknologi fabrikasi digital, termasuk *laser cutting*, mampu meningkatkan pemahaman peserta didik terhadap konsep desain, produksi, dan inovasi secara terpadu, serta mendorong munculnya kreativitas dan kemampuan *problem solving* dalam bidang rekayasa.

Namun demikian, mesin *laser cutting* komersial yang tersedia di pasaran umumnya memiliki harga yang relatif tinggi, baik dari sisi pengadaan awal maupun biaya perawatan dan operasional. Selain itu, kebutuhan akan sistem kontrol, pendingin, serta komponen optik yang presisi turut

meningkatkan kompleksitas dan biaya mesin tersebut. Kondisi ini menjadi kendala tersendiri bagi industri kecil dan menengah (IKM) serta lembaga pendidikan yang memiliki keterbatasan anggaran, sehingga akses terhadap teknologi *laser cutting* menjadi terbatas. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengembangan mesin *laser cutting* alternatif yang lebih ekonomis, mudah dioperasikan, dan mudah dirawat, namun tetap memiliki fungsi dan kinerja yang memadai untuk kebutuhan pendidikan maupun produksi skala kecil.

Seiring dengan berkembangnya teknologi open-source, penggunaan mikrokontroler seperti Arduino serta *firmware GRBL* membuka peluang untuk merancang mesin *laser cutting* skala kecil dengan biaya yang lebih terjangkau. Sistem ini memungkinkan integrasi antara perangkat lunak desain, sistem kontrol numerik, dan aktuator mekanik secara efisien. (Ibrahim 2011) menjelaskan bahwa sistem kontrol berbasis mikrokontroler mampu mengendalikan pergerakan mesin *CNC* secara presisi melalui perintah *G-code*, sehingga sangat sesuai untuk diterapkan pada mesin *laser cutting* sederhana yang membutuhkan akurasi dan kestabilan gerak yang baik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada kegiatan rancang bangun prototipe mesin *laser cutting* yang mengintegrasikan sistem mekanik, sistem elektronik, serta sistem kontrol berbasis mikrokontroler. Pengembangan prototipe ini diharapkan mampu menghasilkan mesin *laser cutting* dengan performa pemotongan yang akurat, stabil, dan andal. Selain itu, prototipe yang dihasilkan diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai sarana pendukung kegiatan praktikum, pelatihan, serta produksi skala kecil, khususnya bagi lembaga pendidikan dan industri dengan keterbatasan sumber daya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi daya laser terhadap tingkat kekasaran permukaan hasil pemotongan?

2. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan pemotongan terhadap tingkat kekasaran permukaan hasil pemotongan?
3. Bagaimana pengaruh variasi jenis material terhadap tingkat kekasaran permukaan hasil pemotongan?
4. Berapa daya optimal yang tepat untuk setiap jenis material?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terfokus dan terarah, maka penulis menetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Benda kerja yang digunakan untuk pengujian adalah lembaran microfiber dengan ketebalan 2 mm, lembaran akrilik dengan ketebalan 2mm; 5mm; 10mm , lembaran triplek 2 mm dan lembaran papan kayu 12mm;
2. Ukuran panjang dan lebar benda kerja adalah 300 mm x 100 mm untuk material kulit, 300 mm x 100 mm untuk material akrilik, 400 mm x 400 mm untuk material triplek, dan 250 mm x 100 mm untuk material papan kayu.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi daya laser terhadap tingkat kekasaran permukaan hasil pemotongan
2. Menganalisis pengaruh variasi ketebalan terhadap tingkat kekasaran permukaan hasil pemotongan;
3. Menganalisis pengaruh variasi jenis material terhadap tingkat kekasaran permukaan hasil pemotongan;
4. Menentukan daya optimal yang tepat untuk setiap jenis material.

1.5 Luaran

Pelaksanaan proyek akhir akan menghasilkan luaran:

1. Laporan tugas akhir;
2. Prototipe mesin *laser cutting*;
3. Paten sederhana dan/atau HKI hak cipta dan/atau artikel ilmiah.

1.6 Sistematika Penulisan Laporan

Dalam pembuatan laporan proyek akhir ini menggunakan sistematik sebagai berikut:

Identik dengan penulisan paragraf setelah “Bab”, maka setelah “Subbab” tidak langsung masuk ke Subsubbab (anak subbab) melainkan tersaji satu paragraf pengantarnya. Tidak diijinkan untuk membentuk Sub-subsubbab (cucu subbab). Jika terjadi seperti itu, maka perlu dicermati lagi untuk bisa sampau anak subbab saja. (Contoh) Untuk memenuhi kaidah penulisan ilmiah, Laporan Proyek Akhir ditulis dalam 5 bab berurutan. Bab-bab tersebut meliputi: (i) pendahuluan, (ii) tinjauan pustaka, (iii) metodologi, (iv) hasil dan pembahasan, dan (v) kesimpulan dan saran, yang dinyatakan sebagai Bab 1, Bab 2, Bab 3, Bab 4, dan Bab 5. Isinya setiap bab diuraikan berikut ini.

1.6.1 Pendahuluan

Bab Pendahuluan berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, luaran, dan sistematika penulisan laporan. Latar belakang berisi situasi dan kondisi (kasus atau imajinasi) yang mendorong munculnya ide-ide atau topik proyek akhir. Untuk dapat mengkaji ide-ide tersebut maka telusur literatur terkait ide-ide dilakukan. Telusur literatur mengerucutkan arah untuk memutuskan pemilihan satu ide. Setelah pemilihan satu ide, masalah akan

timbul ketika ide tersebut akan dimodelkan, disimulasikan, divalidasi, dirancang-bangun, diuji, dan/atau diteliti. Karenanya masalah ini dirumuskan dan dibatasi lingkupnya. Setelah menyatakan masalah, tujuan dan luaran dari proyek akhir disampaikan. Di bagian akhir bab pendahuluan, sistematika penulisan disampaikan.

1.6.2 Tinjauan Pustaka

Bab Tinjauan Pustaka menyampaikan hasil penelusuran pustaka, yang disajikan dalam paragraf-paragraf yang berisi konsep dasar teknologi laser, prinsip kerja mesin *laser cutting*, karakteristik sinar laser, interaksi laser dengan material, mekanisme proses pemotongan laser. Bab ini juga membahas mengenai jenis-jenis mesin *laser cutting*, komponen utama, sistem kontrol dan perangkat lunak serta material pada mesin laser.

1.6.3 Metodologi

Bab metodologi menyampaikan hasil metode yang digunakan dalam menyelesaikan proyek akhir mulai dari awal hingga akhir yang digambarkan yang digambarkan dalam suatu diagram alir. Pada bab ini disampaikan juga gambar rancangan alat, alat dan bahan kerja, prinsip kerja alat, variabel penelitian, metode pengambilan data

1.6.4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini menguraikan deskripsi hasil pabrikan alat, pengambilan data pemotongan bahan uji, hasil pengujian kekasaran pemotongan, proses dan realisasi produk.

1.6. 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini menyampaikan kesimpulan dari hasil yang didapat di kegiatan Proyek akhir. Kesimpulan tidak menyampaikan ulang semua data hasil, melainkan lebih ke spesifikasi dari hasil yang didapat.

Saran merupakan rekomendasi yang ditujukan kepada berbagai pihak terkait dengan kegiatan dan hasil proyek akhir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Teknologi *laser cutting* merupakan salah satu metode pemrosesan material berbasis energi termal yang memanfaatkan sinar laser berintensitas tinggi untuk menghasilkan proses pemotongan yang presisi. Sinar laser yang memiliki sifat monokromatik, koheren, dan kemampuan fokus yang tinggi diarahkan ke permukaan benda kerja sehingga energi cahaya diubah menjadi panas dalam jumlah besar pada area yang sangat kecil. Kondisi ini memungkinkan terjadinya pelelehan atau penguapan material secara terkontrol, menghasilkan jalur potong dengan celah yang sempit serta kualitas tepi potongan yang baik tanpa adanya kontak mekanis langsung antara alat dan benda kerja (Steen and Mazumder 2010).

Mesin *laser cutting* beroperasi sebagai suatu sistem terintegrasi yang terdiri atas sistem optik, sistem mekanik, dan sistem kontrol numerik. Sistem optik berfungsi sebagai sumber energi pemotong, sedangkan sistem mekanik mengatur pergerakan kepala laser secara presisi pada bidang kerja, umumnya melalui konfigurasi sumbu X dan Y. Sistem kontrol berbasis *Computer Numerical Control* (CNC) berperan dalam mengoordinasikan pergerakan mekanik dan pengaktifan laser berdasarkan perintah numerik dalam bentuk *G-code*, sehingga proses pemotongan dapat dilakukan secara otomatis dan konsisten sesuai dengan desain digital yang telah ditentukan (Groover 2010a).

Berdasarkan jenis sumber laser yang digunakan, mesin *laser cutting* dapat diklasifikasikan menjadi laser CO₂, laser *diode*, dan laser fiber. Laser CO₂ banyak digunakan untuk pemotongan material non-logam seperti akrilik dan kayu, sementara laser *diode* umum diterapkan pada mesin *laser cutting* skala kecil karena dimensinya yang kompak dan efisiensi energi yang baik. Laser fiber memiliki keunggulan dalam pemotongan material logam karena efisiensi konversi energi dan kemampuan fokus sinar yang tinggi, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi industri yang membutuhkan kecepatan dan akurasi tinggi (Powell 2017).

Kinerja mesin *laser cutting* sangat dipengaruhi oleh komponen penyusunnya, seperti modul laser, sistem penggerak mekanik, *motor stepper*, *driver motor*, serta sistem catu daya dan pendinginan. Ketelitian sistem mekanik menentukan akurasi posisi kepala laser, sedangkan kestabilan sistem kontrol dan kelistrikan berpengaruh langsung terhadap konsistensi daya laser dan kualitas lintasan pemotongan. Integrasi yang baik antar komponen tersebut menjadi faktor utama dalam menghasilkan mesin *laser cutting* yang stabil dan andal selama proses operasi (Steen and Mazumder 2010).

Pengoperasian mesin *laser cutting* modern umumnya didukung oleh sistem kontrol berbasis mikrokontroler yang dipadukan dengan *firmware open source*, seperti *GRBL*. Mikrokontroler berfungsi menerjemahkan perintah *G-code* menjadi sinyal kendali untuk *motor stepper* dan modul laser, sehingga lintasan pemotongan dapat dieksekusi sesuai perencanaan. Perangkat lunak antarmuka, seperti *Laser GRBL* atau *Universal G-code Sender*, digunakan untuk menghubungkan desain berbasis *CAD* dengan mesin, memungkinkan proses fabrikasi dilakukan secara efisien dan presisi (Monk 2013).

Selain sistem mesin, karakteristik material juga memiliki peranan penting dalam proses *laser cutting*. Setiap material memiliki sifat fisik dan termal yang berbeda, seperti titik leleh, kemampuan menyerap energi laser, dan konduktivitas panas, yang akan mempengaruhi kebutuhan daya laser serta kecepatan pemotongan. Pemahaman terhadap respons material terhadap sinar laser diperlukan agar parameter pemotongan dapat ditentukan secara tepat dan menghasilkan kualitas potong yang optimal (Powell 2017).

Dalam konteks rekayasa perancangan, aspek perhitungan teknis menjadi bagian penting dalam pengembangan mesin *laser cutting*. Perhitungan yang berkaitan dengan kebutuhan daya laser, kecepatan pemotongan, torsi motor penggerak, serta resolusi dan akurasi gerak mesin diperlukan untuk memastikan bahwa sistem yang dirancang mampu bekerja sesuai spesifikasi teknis dan memiliki tingkat keandalan yang memadai. Pendekatan ini juga menjadi dasar dalam evaluasi

kinerja mesin *laser cutting* yang dikembangkan untuk kebutuhan pendidikan dan produksi skala kecil (Gershenfeld 2005)

2.1 Konsep Dasar Teknologi Laser

Laser merupakan sumber cahaya buatan yang dihasilkan melalui proses emisi terstimulasi, sehingga menghasilkan pancaran cahaya yang terarah dan memiliki energi tinggi. Prinsip dasar kerja laser melibatkan proses eksitasi medium aktif oleh sumber energi tertentu hingga tercapai kondisi yang memungkinkan terjadinya penguatan cahaya. Cahaya yang dihasilkan kemudian dipancarkan dalam bentuk sinar yang stabil dan terkontrol, sehingga dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi teknik dan industri, termasuk proses pemotongan material (Steen and Mazumder 2010).

Sinar laser memiliki karakteristik utama yang membedakannya dari cahaya konvensional, yaitu bersifat monokromatik, koheren, dan mampu difokuskan pada area yang sangat kecil. Kemampuan fokus energi memungkinkan sinar laser menghasilkan kerapatan energi yang tinggi pada titik tertentu, sehingga cocok digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan ketelitian dan presisi tinggi (Groover 2010b).

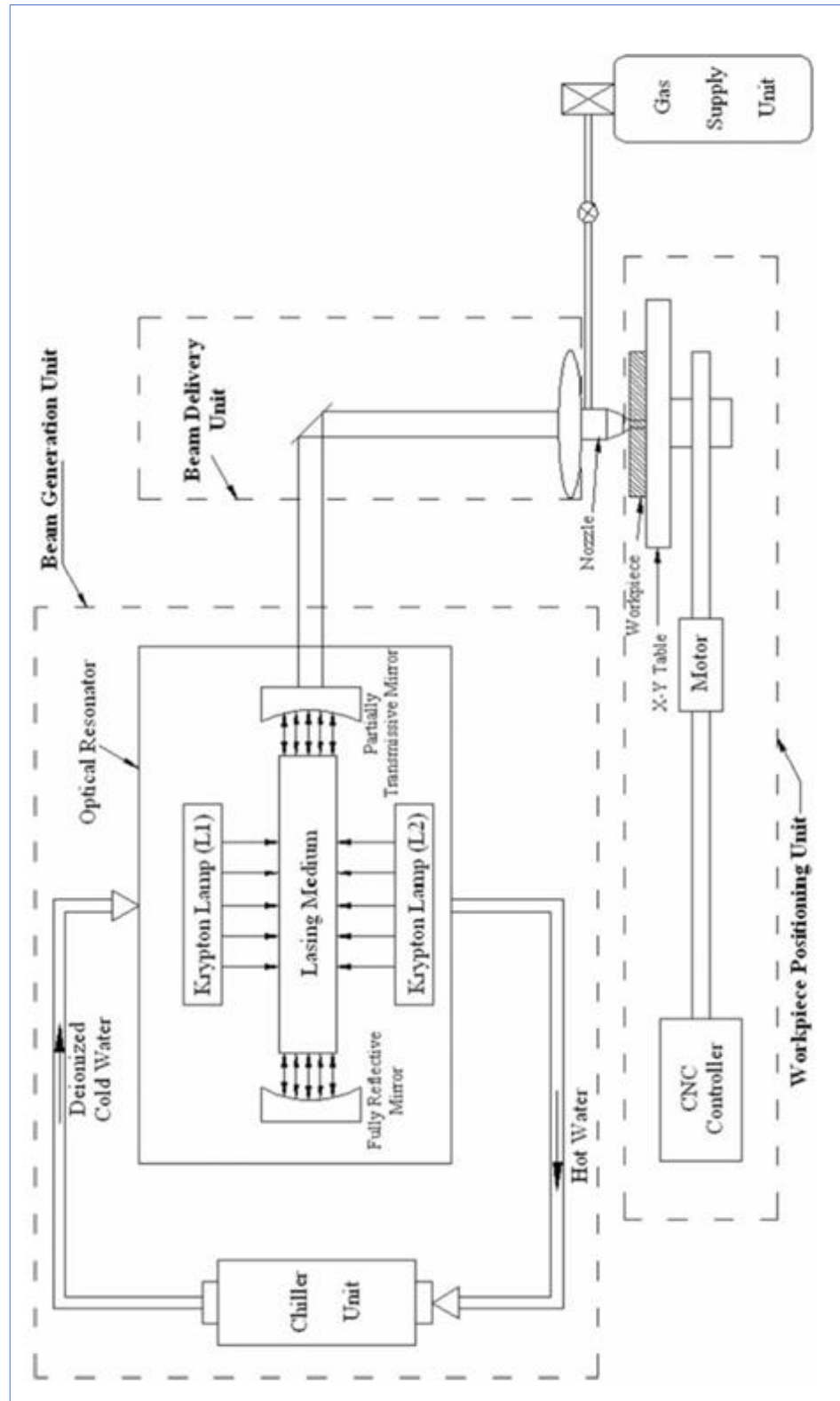
Ketika sinar laser diarahkan ke permukaan material, terjadi interaksi antara energi laser dan material tersebut. Energi cahaya yang diserap akan diubah menjadi energi panas, sehingga menyebabkan kenaikan temperatur lokal pada area yang terkena laser. Besarnya energi yang diserap dipengaruhi oleh karakteristik material, seperti kemampuan menyerap cahaya, konduktivitas panas, serta sifat fisik lainnya. Interaksi ini menjadi dasar terjadinya perubahan fase material, seperti pelelehan atau penguapan, yang dimanfaatkan dalam proses pemotongan laser (Dubey and Yadava 2008).

Berdasarkan mekanisme termal yang terjadi, proses pemotongan laser dapat dibedakan menjadi beberapa jenis. *Fusion cutting* terjadi ketika material dilelehkan oleh panas laser dan dikeluarkan dari celah potong dengan bantuan gas. *Vaporization cutting* terjadi apabila energi laser cukup besar untuk

langsung menguapkan material. Sementara itu, *reactive cutting* melibatkan reaksi kimia antara material dan gas bantu yang menghasilkan panas tambahan sehingga meningkatkan efisiensi pemotongan. Mekanisme-mekanisme tersebut digunakan sesuai dengan jenis material dan kebutuhan proses pemotongan (Powell 2017).

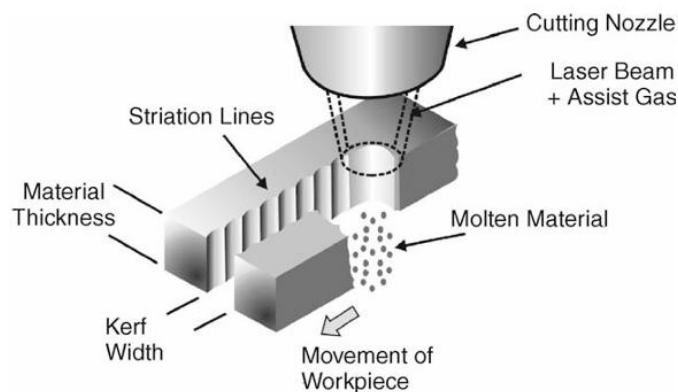
2.1.1 Prinsip Kerja Mesin *Laser Cutting*

Prinsip kerja mesin *laser cutting* didasarkan pada pemanfaatan sinar laser berenergi tinggi yang difokuskan pada permukaan material untuk menghasilkan pemotongan secara termal. Proses diawali dengan pembangkitan sinar laser dari sumber laser, seperti laser CO₂, fiber, atau Nd:YAG, yang kemudian diarahkan melalui sistem optik berupa cermin dan lensa fokus. Sistem optik ini berfungsi untuk mengonsentrasikan energi laser ke titik fokus dengan diameter sangat kecil sehingga menghasilkan kerapatan energi yang tinggi. Ketika sinar laser mengenai permukaan material, energi cahaya diserap dan dikonversi menjadi energi panas, menyebabkan peningkatan temperatur secara lokal hingga material mengalami pelelehan, penguapan, atau reaksi termokimia tertentu sesuai dengan mekanisme pemotongan yang digunakan (Steen and Mazumder 2010).



Gambar 2. 1 Skema Diagram Mesin *Laser Cutting*
 Sumber : (Alsaadawy, et al., 2023)

Selama proses pemotongan, mesin *laser cutting* menggunakan gas bantu bertekanan yang dialirkan melalui nozzle di sekitar titik fokus laser. Gas bantu ini berfungsi untuk mengeluarkan material leleh atau hasil penguapan dari celah potong, mencegah penumpukan panas berlebih, serta meningkatkan kualitas tepi potong. Jenis gas yang digunakan dapat berupa gas inert, seperti nitrogen, atau gas reaktif, seperti oksigen, tergantung pada material dan tujuan pemotongan. Seluruh proses pemotongan dikendalikan oleh sistem kontrol numerik berbasis komputer (CNC) yang mengatur pergerakan kepala laser dan meja kerja sesuai dengan lintasan pemotongan yang telah diprogram. Kombinasi antara sumber energi laser yang terfokus, sistem optik, gas bantu, dan kontrol numerik memungkinkan mesin *laser cutting* menghasilkan potongan dengan presisi tinggi, kualitas permukaan yang baik, serta zona terpengaruh panas yang relatif kecil dibandingkan metode pemotongan konvensional (Groover 2010b; Powell 2017)



Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses *Laser Cutting* pada Material Logam

Sumber : (Abdel Ghany & Newishy, 2005)

2.1.1. Pengertian dan Prinsip Kerja Laser

Laser merupakan perangkat yang menghasilkan cahaya berenergi tinggi melalui proses emisi terstimulasi radiasi (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Cahaya laser dihasilkan dari interaksi partikel-partikel dalam suatu medium aktif yang berada pada kondisi eksitasi. Ketika partikel tersebut mengalami transisi dari tingkat energi

tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah, energi dilepaskan dalam bentuk foton. Pada kondisi tertentu, foton yang dihasilkan dapat merangsang partikel lain untuk memancarkan foton dengan fase, arah, dan panjang gelombang yang sama, sehingga terjadi proses penguatan cahaya secara berkelanjutan (Steen and Mazumder 2010)

Prinsip kerja laser didukung oleh tiga komponen utama, yaitu medium aktif, sumber pemompa energi (*pumping source*), dan resonator optik. Medium aktif berfungsi sebagai tempat terjadinya proses emisi terstimulasi dan dapat berupa bahan gas, cair, maupun padat. Sumber pemompa energi digunakan untuk mengeksitasi medium aktif hingga tercapai kondisi inversi populasi, yaitu keadaan ketika jumlah partikel pada tingkat energi tinggi melebihi jumlah partikel pada tingkat energi rendah. *Resonator* optik yang terdiri dari dua cermin berfungsi memantulkan cahaya secara berulang di dalam medium aktif, sehingga intensitas cahaya meningkat sebelum sebagian energi dipancarkan keluar sebagai sinar laser (Powell 2017).

Cahaya laser yang dihasilkan memiliki arah rambat yang terkontrol dan dapat difokuskan pada area yang sangat kecil. Kemampuan ini memungkinkan laser menghasilkan kerapatan energi yang tinggi pada titik fokus, sehingga efektif digunakan sebagai sumber panas dalam berbagai aplikasi teknik. Dalam bidang industri, prinsip kerja laser dimanfaatkan pada proses pemrosesan material karena kemampuannya menghasilkan energi termal secara presisi tanpa kontak langsung dengan benda kerja, sehingga mengurangi keausan alat dan deformasi mekanik (Groover 2010b).

Pada aplikasi pemotongan material, sinar laser diarahkan dan difokuskan ke permukaan benda kerja sehingga energi cahaya diubah menjadi energi panas dalam waktu yang sangat singkat. Peningkatan temperatur lokal yang cepat menyebabkan material mengalami pelelehan atau penguapan, tergantung pada parameter operasi laser dan sifat material yang diproses. Prinsip kerja ini menjadikan laser sebagai teknologi yang

fleksibel dan efisien dalam sistem pemotongan modern, baik untuk keperluan industri maupun pengembangan mesin skala kecil (Dubey and Yadava 2008).

2.1.2 Karakteristik Sinar Laser

Sinar laser memiliki karakteristik khas yang membedakannya dari sumber cahaya konvensional, sehingga sangat sesuai digunakan dalam aplikasi presisi seperti pemotongan material. Karakteristik utama sinar laser meliputi sifat monokromatik, koheren, dan kemampuan fokus energi yang tinggi. Ketiga karakteristik tersebut saling berkaitan dan berperan penting dalam menentukan efektivitas laser sebagai sumber energi dalam proses pemrosesan material (Steen and Mazumder 2010). Karakteristik utama sinar laser dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Monokromatik

Sinar laser bersifat monokromatik, yaitu memiliki panjang gelombang yang hampir tunggal atau berada dalam rentang yang sangat sempit. Berbeda dengan cahaya biasa yang terdiri dari berbagai panjang gelombang, sinar laser memancarkan energi pada satu panjang gelombang tertentu yang ditentukan oleh jenis medium aktif yang digunakan. Sifat monokromatik ini memungkinkan interaksi antara sinar laser dan material berlangsung secara lebih konsisten dan terkontrol, karena sifat optik material terhadap panjang gelombang tertentu dapat diprediksi dengan baik. Karakteristik ini berperan penting dalam proses pemotongan laser karena memengaruhi tingkat penyerapan energi oleh material (Groover 2010b).

2. Koheren

Coherent



Gambar 2. 4 Sifat Koheren Sinar Laser

Sumber : (Lee, et al., 2020)

Karakteristik koheren menunjukkan bahwa gelombang cahaya laser memiliki keselarasan fase, baik secara temporal maupun spasial. Koherensi temporal berkaitan dengan kestabilan fase gelombang terhadap waktu, sedangkan koherensi spasial berkaitan dengan keseragaman fase pada seluruh penampang sinar. Sifat koheren menyebabkan sinar laser memiliki divergensi yang sangat kecil sehingga dapat merambat dalam satu arah secara stabil tanpa penyebaran energi yang signifikan. Kondisi ini memungkinkan sinar laser diarahkan dan dikendalikan dengan presisi tinggi menggunakan sistem optik, yang sangat penting dalam aplikasi pemrosesan material (Powell 2017).

3. Fokus Energi atau Kolimasi

Collimated



Gambar 2. 5 Sifat Fokus Energi atau Kolimasi Sinar Laser

Sumber : (Lee, et al., 2020)

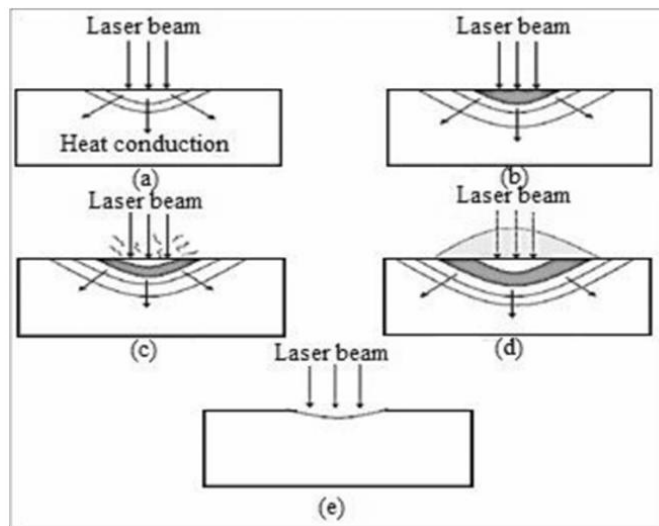
Sinar laser memiliki kemampuan untuk memfokuskan energi pada area yang sangat kecil dengan bantuan lensa atau sistem optik. Kemampuan fokus energi ini menghasilkan kerapatan energi yang tinggi pada titik fokus, sehingga memungkinkan terjadinya peningkatan temperatur lokal secara cepat hingga mencapai titik leleh atau titik uap material. Dengan energi yang terpusat pada area kerja, proses pemotongan dapat dilakukan secara efisien dengan pengaruh termal minimal pada area di sekitarnya. Karakteristik fokus energi menjadikan laser sebagai sumber panas yang efektif dan terkontrol dalam proses pemotongan material (Dubey and Yadava 2008).

2.1.3 Interaksi Laser dengan Material

Interaksi antara sinar laser dan material terjadi ketika energi cahaya yang dipancarkan laser mengenai permukaan material dan sebagian atau seluruhnya diserap. Energi yang diserap tersebut kemudian dikonversi menjadi energi panas, sehingga menyebabkan peningkatan temperatur lokal pada area yang terkena laser. Besarnya energi yang diserap sangat dipengaruhi oleh sifat optik material, seperti koefisien absorpsi dan reflektivitas, yang bergantung pada jenis material serta panjang gelombang laser yang digunakan. Material dengan tingkat absorpsi tinggi terhadap panjang gelombang tertentu akan lebih efektif menyerap energi laser dibandingkan material dengan reflektivitas tinggi (Steen and Mazumder 2010).

Selain sifat optik, interaksi laser dengan material juga dipengaruhi oleh sifat fisik dan termal material, seperti konduktivitas panas, kapasitas panas, titik leleh, dan titik uap. Material dengan konduktivitas panas rendah cenderung mengalami peningkatan temperatur yang lebih cepat pada area pemaparan laser, sehingga lebih mudah mengalami pelelehan atau penguapan. Sebaliknya, material dengan konduktivitas panas tinggi akan menyebarkan panas ke area sekitarnya, yang dapat mempengaruhi efisiensi proses dan kualitas hasil pemotongan (Powell 2017).

Pada saat energi laser yang diserap cukup besar, material dapat mengalami perubahan fase, seperti pemanasan (*heating*), lelehan (*melting*), penguapan (*vaporization*), pembentukan plasma, dan ablasi. Proses ini membentuk dasar dari berbagai aplikasi pemrosesan material berbasis laser, termasuk pemotongan, pengelasan, dan pengeboran. Selama proses tersebut, zona kecil di sekitar titik interaksi laser akan mengalami pengaruh termal yang dikenal sebagai *heat affected zone* (HAZ). Ukuran HAZ dipengaruhi oleh durasi paparan laser, daya laser, serta sifat termal material, dan menjadi salah satu parameter penting dalam menentukan kualitas hasil proses (Groover 2010b).



Gambar 2. 6 Ilustrasi Efek yang terjadi Interaksi Laser dengan

(a) pemanasan, (b) pelelehan permukaan, (c) penguapan permukaan, (d) pembentukan plasma, dan (e) ablasi

Sumber : (Deepa, et al., 2016)

Interaksi laser dengan material juga dapat melibatkan fenomena tambahan seperti refleksi ulang, plasma formation, dan reaksi kimia dengan gas bantu. Pada beberapa aplikasi pemotongan, gas bantu digunakan untuk membantu mengeluarkan material cair dari celah potong atau untuk menghasilkan panas tambahan melalui reaksi eksotermis. Kombinasi antara energi laser dan kondisi lingkungan proses ini memungkinkan pengendalian

yang lebih baik terhadap mekanisme pemrosesan dan kualitas hasil akhir. Oleh karena itu, pemahaman mengenai interaksi laser dengan material menjadi aspek fundamental dalam perancangan dan pengoperasian sistem *laser cutting* yang efektif dan efisien (Dubey and Yadava 2008).

2.1.4 Mekanisme Proses Pemotongan Laser

Proses pemotongan laser merupakan metode pemrosesan material yang memanfaatkan energi panas tinggi dari sinar laser untuk memisahkan material sepanjang jalur potong yang telah ditentukan. Ketika sinar laser difokuskan pada permukaan material, energi cahaya diserap dan dikonversi menjadi energi panas sehingga menaikkan temperatur lokal material hingga melampaui titik leleh atau titik uapnya. Material yang mengalami pelelehan atau penguapan kemudian dikeluarkan dari celah potong dengan bantuan gas bertekanan, sehingga terbentuk celah potong (*kerf*) yang sempit dan presisi tinggi. Mekanisme pemotongan laser dipengaruhi oleh daya laser, kecepatan pemotongan, jenis material, serta jenis gas bantu yang digunakan, yang secara keseluruhan menentukan kualitas hasil pemotongan dan zona terpengaruh panas (*heat affected zone*) (Steen and Mazumder 2010; Powell 2017)

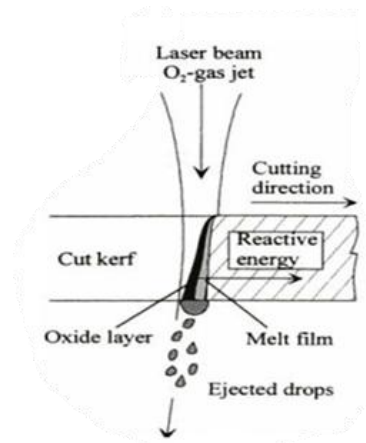
Secara umum, mekanisme pemotongan laser dapat diklasifikasikan berdasarkan cara material mengalami pemisahan selama proses pemotongan menjadi tiga jenis utama, yaitu :

1. Fusion Cutting

Fusion cutting merupakan mekanisme pemotongan laser di mana material dipanaskan hingga mencapai titik leleh tanpa mengalami reaksi kimia dengan gas bantu. Pada metode ini, energi laser menyebabkan material meleleh, kemudian lelehan tersebut dikeluarkan dari area pemotongan menggunakan gas inert, seperti nitrogen atau argon. Mekanisme ini banyak digunakan untuk memotong material logam seperti baja tahan karat dan aluminium karena menghasilkan permukaan potong

yang bersih serta meminimalkan terjadinya oksidasi. Kualitas hasil potongan pada *fusion cutting* sangat dipengaruhi oleh kestabilan daya laser dan tekanan gas bantu dalam mengeluarkan lelehan material dari celah potong (Powell 2017; Steen and Mazumder 2010)

2. *Vaporization Cutting*

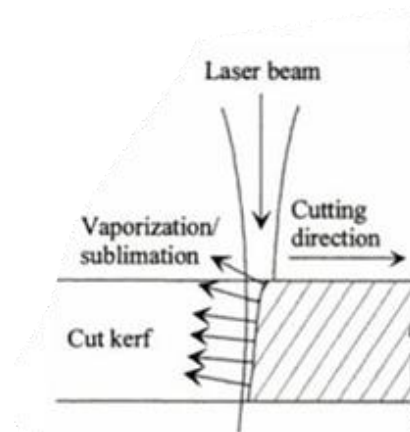


Gambar 2. 7 Ilustrasi *Vaporization Cutting*

Sumber : Muhammad (2012)

Vaporization cutting terjadi ketika energi laser yang diberikan cukup tinggi untuk menaikkan temperatur material hingga melampaui titik uapnya, sehingga material langsung menguap tanpa melalui fase leleh yang signifikan. Proses ini umumnya digunakan pada material non-logam atau material dengan titik leleh relatif rendah, seperti kayu, plastik, dan beberapa jenis polimer. Mekanisme penguapan ini menghasilkan celah potong yang sangat sempit, namun dapat menyebabkan terbentuknya zona terpengaruh panas yang lebih besar serta permukaan potong yang kasar akibat laju penguapan yang tinggi. Oleh karena itu, *vaporization cutting* lebih cocok digunakan pada aplikasi yang tidak menuntut kualitas permukaan yang sangat tinggi (Groover 2010b; Dubey and Yadava 2008).

3. *Reactive Cutting*



Gambar 2. 8 *Reactive Cutting*

Sumber : Muhammad (2012)

Reactive cutting merupakan mekanisme pemotongan laser yang melibatkan reaksi kimia antara material dan gas bantu reaktif, umumnya oksigen. Pada metode ini, energi laser berfungsi sebagai pemicu awal pemanasan material hingga mencapai temperatur reaksi, kemudian reaksi eksotermis antara material dan oksigen menghasilkan panas tambahan yang membantu proses pemotongan. Mekanisme ini banyak digunakan untuk pemotongan baja karbon karena dapat meningkatkan kecepatan pemotongan dan efisiensi energi. Namun, *reactive cutting* cenderung menghasilkan lapisan oksida pada permukaan potong dan zona terpengaruh panas yang lebih luas dibandingkan *fusion cutting* (Steen and Mazumder 2010; Powell 2017).

2.2 *Mesin Laser Cutting*

Mesin *laser cutting* merupakan salah satu teknologi pemrosesan material yang berkembang pesat seiring meningkatnya kebutuhan industri terhadap proses pemotongan yang presisi, efisien, dan fleksibel. Teknologi ini memanfaatkan sinar laser berenergi tinggi yang difokuskan pada permukaan material untuk menghasilkan pemisahan material secara termal dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Dibandingkan dengan metode pemotongan konvensional, mesin *laser cutting* mampu menghasilkan bentuk potongan yang kompleks, kualitas tepi potong yang baik, serta zona terpengaruh panas

yang relatif kecil. Keunggulan tersebut menjadikan mesin *laser cutting* banyak diaplikasikan dalam berbagai sektor industri, seperti manufaktur logam, otomotif, elektronik, hingga bidang medis. Selain itu, integrasi mesin *laser cutting* dengan sistem kontrol berbasis komputer memungkinkan proses pemotongan dilakukan secara otomatis dan konsisten sesuai desain yang telah ditentukan, sehingga meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil produksi (Steen and Mazumder 2010).

2.2.1 Pengertian Mesin *Laser Cutting*

Mesin *laser cutting* merupakan sistem pemrosesan material berbasis energi termal yang menggunakan sinar laser berdaya tinggi sebagai sumber panas untuk memotong material secara presisi. Sinar laser dihasilkan oleh sumber laser tertentu (seperti CO₂, fiber, atau Nd:YAG) kemudian diarahkan dan difokuskan melalui sistem optik sehingga menghasilkan kerapatan energi yang sangat tinggi pada titik fokus. Ketika sinar laser mengenai permukaan material, energi cahaya tersebut diserap dan dikonversi menjadi energi panas, menyebabkan material mengalami peningkatan temperatur secara lokal hingga mencapai kondisi pelelehan, penguapan, atau reaksi termokimia tertentu, tergantung pada jenis material dan parameter proses. Proses pemotongan umumnya dibantu oleh gas bertekanan yang berfungsi untuk mengeluarkan material cair atau uap dari celah potong serta meningkatkan kualitas hasil pemotongan. Mesin *laser cutting* dikendalikan oleh sistem kontrol numerik berbasis komputer (CNC) yang memungkinkan pengaturan parameter seperti daya laser, kecepatan pemotongan, dan lintasan gerak secara akurat dan berulang. Kombinasi antara sumber energi yang terfokus, kontrol numerik, dan mekanisme bantu tersebut menjadikan mesin *laser cutting* mampu menghasilkan potongan dengan tingkat presisi tinggi, kualitas tepi potong yang baik, serta zona terpengaruh panas yang relatif kecil dibandingkan metode pemotongan konvensional, sehingga banyak diterapkan dalam industri manufaktur modern untuk pemrosesan material logam maupun non-logam (Powell 2017).

2.3 Jenis-Jenis Mesin *Laser Cutting*

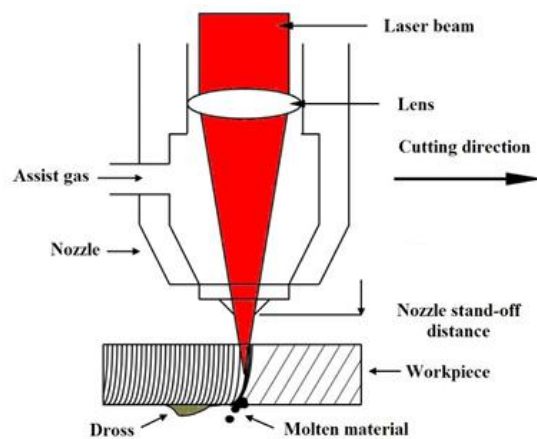
Mesin *laser cutting* dikembangkan dengan berbagai jenis sumber laser untuk menyesuaikan kebutuhan pemotongan material, tingkat presisi, serta efisiensi proses. Perbedaan utama antar jenis mesin *laser cutting* terletak pada karakteristik sumber laser yang digunakan, seperti panjang gelombang, efisiensi energi, dan kemampuan interaksi dengan material tertentu. Pencocokan sebagian besar sumber laser yang tepat dengan material yang akan diolah menjamin hasil terbaik. Setiap jenis laser menghasilkan sinar laser pada panjang gelombang yang dipancarkan.

Berdasarkan sumber laser yang digunakan, mesin *laser cutting* dibedakan menjadi laser CO₂, laser diode, dan laser fiber, yang masing-masing memiliki karakteristik dan aplikasi berbeda pada material logam maupun non-logam (Groover 2010b; Steen and Mazumder 2010).

Dalam aplikasinya, mesin *laser cutting* digunakan secara luas di sektor manufaktur, desain produk, periklanan, dan pendidikan. Di industri manufaktur, mesin ini mendukung produksi komponen mekanik presisi, papan sirkuit cetak, dan ukiran logam (Groover 2010b). Di dunia pendidikan dan penelitian, mesin *laser cutting* digunakan sebagai sarana untuk eksperimen, pengembangan prototipe, dan pembuatan alat bantu pembelajaran berbasis *digital fabrication* (Gershenfeld 2005).

2.3.1 Laser CO₂ (Carbon Dioxide Laser)

Laser CO₂ merupakan jenis laser gas yang banyak digunakan dalam aplikasi pemotongan dan pemrosesan material. Laser ini menggunakan campuran gas CO₂, N₂, dan He sebagai medium aktif, di mana energi listrik mengeksitasi molekul nitrogen yang kemudian mentransfer energi ke molekul karbon dioksida hingga menghasilkan emisi laser melalui proses emisi terstimulasi (Steen and Mazumder 2010).



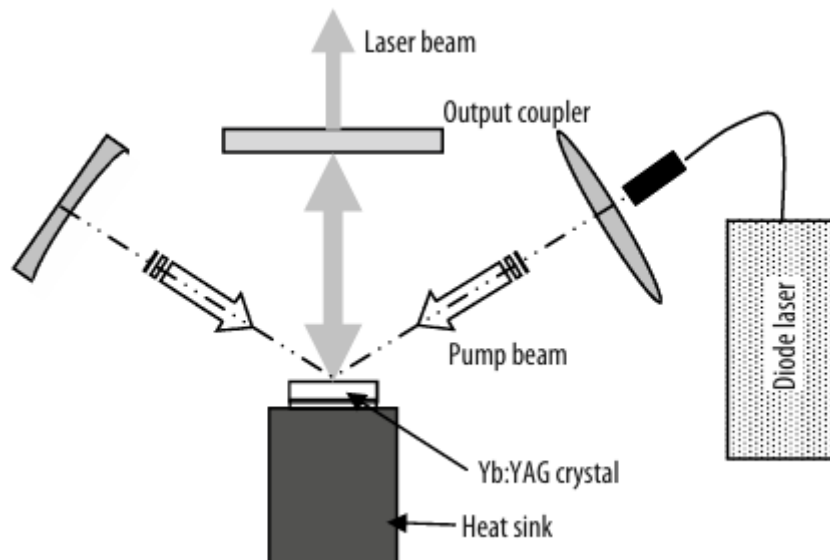
Gambar 2. 9 Ilustrasi Pemotongan dengan Laser CO₂

Sumber : (M., et al., 2016)

Laser CO₂ menghasilkan sinar laser dengan panjang gelombang sekitar 10,6 μm pada wilayah inframerah yang memiliki tingkat penyerapan tinggi terhadap material non-logam seperti kayu, akrilik, plastik, dan kertas, sehingga efektif digunakan untuk proses pemotongan, *engraving*, dan *marking* dengan kualitas tepi potongan yang baik (Groover 2010b). Dalam mesin *laser cutting*, laser CO₂ mampu menghasilkan potongan yang halus dan presisi tinggi tanpa kontak langsung dengan benda kerja, serta dapat digunakan untuk pemotongan logam tipis seperti baja karbon dengan bantuan gas oksigen (Steen and Mazumder 2010).

2.3.2 Laser Diode (Diode-Pumped Solid-State Laser)

Laser Diode atau Diode-Pumped Solid-State Laser (DPSSL) merupakan jenis laser yang menggunakan dioda semikonduktor sebagai sumber pemompa untuk mengeksitasi medium aktif padat, seperti kristal Nd:YAG, hingga menghasilkan emisi laser melalui proses emisi terstimulasi (Steen and Mazumder 2010). Laser ini memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi, ukuran sistem yang relatif kompak, serta konsumsi daya yang lebih rendah dibandingkan laser CO₂ (Groover 2010b).

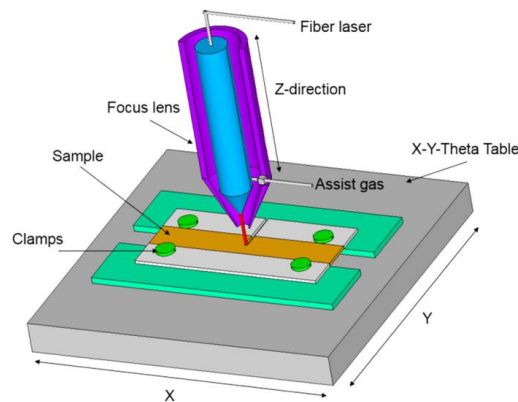


Gambar 2. 10 Ilustrasi Pemotongan dengan Laser Diode

Sumber : (Steen & Mazumder 2010)

Laser diode umumnya menghasilkan panjang gelombang pada rentang 450–980 nm, sedangkan DPSSL berbasis Nd:YAG menghasilkan panjang gelombang utama 1064 nm yang banyak digunakan dalam aplikasi pemrosesan material presisi (Steen and Mazumder 2010). Pada mesin *laser cutting* skala kecil dan menengah, laser diode banyak dimanfaatkan karena biaya yang relatif terjangkau serta kemudahan integrasi dengan sistem kontrol berbasis mikrokontroler. Aplikasi laser ini meliputi pemotongan dan *engraving* material tipis seperti kayu, akrilik, plastik, dan kertas (Groover 2010b; Gershenfeld 2005).

2.3.3 Fiber Laser



Gambar 2. 11 Fiber Laser

sumber : [Microelectronics and Packaging Society](#)

Fiber Laser merupakan jenis laser *solid state* yang menggunakan serat optik yang didoping unsur tanah jarang, seperti ytterbium (Yb), sebagai medium aktif. Laser ini dipompa oleh laser diode dan menghasilkan emisi laser melalui proses emisi terstimulasi dengan efisiensi tinggi serta kualitas berkas yang baik (Steen and Mazumder 2010).

Fiber laser menghasilkan panjang gelombang sekitar $1,06\text{ }\mu\text{m}$ yang memiliki tingkat penyerapan tinggi pada material logam, sehingga sangat efektif digunakan untuk pemotongan, pengelasan, dan penandaan logam seperti baja karbon, baja tahan karat, aluminium, dan kuningan dengan kecepatan serta presisi tinggi (Groover 2010b).

Dalam mesin *laser cutting*, fiber laser memiliki efisiensi energi yang tinggi, ukuran sistem yang kompak, dan kebutuhan perawatan yang rendah, serta mampu menghasilkan potongan sempit dan detail tinggi pada material logam dengan ketebalan menengah hingga tinggi (Steen and Mazumder 2010).

2.4 Komponen Utama Mesin *Laser Cutting*

Mesin *laser cutting* merupakan sistem terintegrasi yang terdiri dari beberapa komponen utama yang saling berhubungan untuk menghasilkan proses pemotongan yang presisi, stabil, dan aman. Setiap komponen memiliki peran penting dalam menentukan kinerja mesin, kualitas hasil potong, serta keandalan operasi secara keseluruhan. Komponen utama tersebut meliputi modul laser, sistem mekanik penggerak, driver motor, power supply, mikrokontroler dan sistem kontrol, serta sistem pendinginan dan keamanan (Steen and Mazumder 2010; Groover 2010a).

2.4.1 Modul Laser

Modul laser berfungsi sebagai sumber pembangkit sinar laser yang digunakan dalam proses pemotongan. Modul ini umumnya terdiri dari elemen aktif laser, rangkaian pengendali arus, serta sistem pendinginan terintegrasi. Jenis modul laser yang digunakan, seperti laser diode, laser CO₂, atau fiber laser, menentukan karakteristik sinar laser berupa daya, panjang gelombang, dan kualitas berkas, yang secara langsung memengaruhi kemampuan pemotongan material (Steen and Mazumder 2010).

2.4.2 Sistem Mekanik Penggerak

Sistem penggerak pada mesin *laser cutting* merupakan subsistem mekanik yang berfungsi mengatur pergerakan dan posisi kepala laser terhadap material kerja secara presisi. Sistem ini sangat berpengaruh terhadap akurasi dimensi, kualitas hasil potongan, serta kestabilan proses pemotongan. Komponen utama dalam sistem ini meliputi:

1. Rel linear dan *pulley*



Gambar 2. 12 Rel Linear
Sumber: id.made-in-china.com

berfungsi sebagai jalur dan elemen pendukung gerak kepala laser agar dapat bergerak secara lurus, stabil, dan presisi pada sumbu X dan Y. Penggunaan rel linear bertujuan untuk meminimalkan gesekan dan getaran selama proses pemotongan, sehingga posisi kepala laser tetap akurat meskipun bergerak dengan kecepatan tinggi (Gershenfeld 2005). *Pulley* digunakan sebagai bagian dari sistem transmisi untuk menghubungkan motor penggerak dengan *timing belt*.

2. *Timing belt*

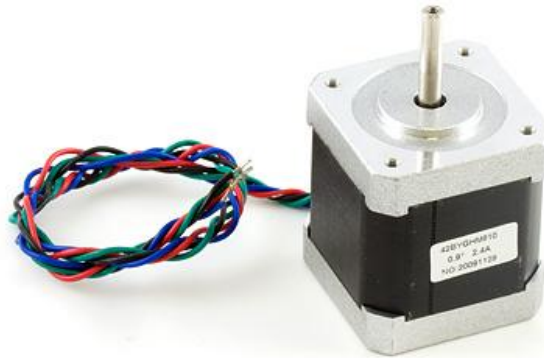


Gambar 2. 13 Timing Belt
Sumber : <https://cnpowerbelt.en.made-in-china.com>

berfungsi mentransmisikan putaran motor ke sistem gerak secara sinkron tanpa slip. Komponen ini banyak digunakan pada mesin *laser cutting* skala kecil dan menengah karena memiliki keunggulan berupa operasi yang halus, kebisingan rendah, serta kemudahan perawatan. Selain itu, *timing belt* memungkinkan sistem bergerak

dengan kecepatan tinggi tanpa mengorbankan presisi posisi (Gershenfeld 2005).

3. *Stepper* motor

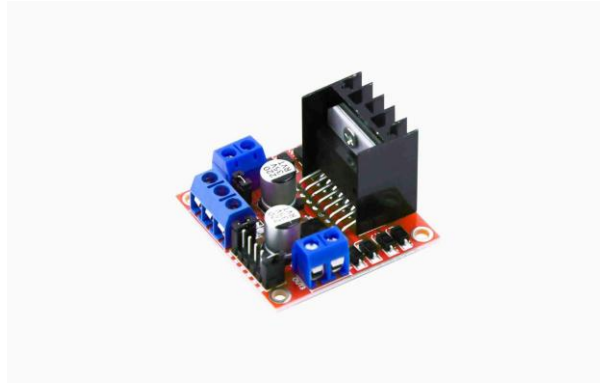


Gambar 2. 14 *Stepper* Motor
Sumber: <https://www.phidgets.com>

jenis motor penggerak yang paling umum digunakan dalam mesin *laser cutting* berbasis CNC karena kemampuannya menghasilkan gerakan dalam langkah-langkah kecil yang terkontrol. Setiap langkah motor dapat diatur secara digital melalui sistem kontrol, sehingga posisi kepala laser dapat ditentukan dengan tingkat ketelitian yang tinggi tanpa memerlukan sistem umpan balik tambahan. Karakteristik ini menjadikan *stepper* motor sangat sesuai untuk aplikasi pemotongan presisi pada mesin *laser cutting* desktop (Ibrahim 2011; Groover 2010a).

Konfigurasi sistem gerak dua sumbu (X dan Y) merupakan konfigurasi yang paling umum digunakan pada mesin *laser cutting* desktop dan pendidikan, karena sudah memadai untuk pemotongan bentuk dua dimensi. Pada aplikasi industri yang lebih kompleks, sistem tiga sumbu (X, Y, dan Z) digunakan untuk mengatur fokus laser atau melakukan pemotongan tiga dimensi, sehingga fleksibilitas dan kemampuan pemrosesan material dapat ditingkatkan (Steen and Mazumder 2010)

2.4.3 Driver Motor dan Catu Daya (*Power Supply*)



Gambar 2. 15 *Driver Motor*
Sumber : <https://id.szks-kuongshun.com>



Gambar 2. 16 *Catu Daya*
Sumber : <https://variometrum.hu/en/laser-power-supply-50w>

Stepper motor pada mesin *laser cutting* dikendalikan oleh *driver* motor yang mengatur distribusi arus listrik ke setiap fasa motor berdasarkan sinyal pulsa langkah (*step*) dan arah (*direction*) dari mikrokontroler. *Driver* motor berperan penting dalam menjaga presisi gerakan, akurasi posisi, serta melindungi motor dari arus berlebih selama operasi (Ibrahim 2011; Groover 2010a).

Driver yang umum digunakan pada mesin *laser cutting* skala kecil hingga menengah adalah A4988 dan DRV8825, yang mendukung fitur *microstepping* untuk menghasilkan gerakan lebih halus serta dilengkapi pembatas arus dan proteksi termal guna meningkatkan keandalan sistem (Monk 2013).

Power supply berfungsi menyediakan tegangan yang stabil bagi seluruh sistem, baik untuk rangkaian logika (5 V/12 V) maupun aktuator

seperti stepper motor dan modul laser (12 V/24 V DC). Kestabilan catu daya sangat berpengaruh terhadap performa sistem, karena fluktuasi tegangan dapat menyebabkan gangguan kontrol dan penurunan kualitas pemotongan (Groover 2010a; Monk 2013). Oleh karena itu, pemilihan power supply dengan kapasitas arus dan sistem proteksi yang memadai menjadi faktor penting dalam perancangan mesin *laser cutting* (Ibrahim 2011).

2.4.4 Sistem Pendinginan Laser

Sistem pendinginan pada mesin *laser cutting* berfungsi menjaga suhu kerja modul laser dan komponen elektronik agar tetap berada dalam batas aman selama proses operasi. Pengendalian suhu yang baik sangat penting karena kenaikan temperatur yang berlebihan dapat menurunkan efisiensi laser, mengganggu kestabilan daya keluaran, serta memperpendek umur pakai komponen. Pendinginan dapat dilakukan secara pasif menggunakan heatsink dan kipas, atau secara aktif menggunakan sistem pendingin cair (*water cooling*), terutama dikenal efektif untuk modul laser dengan daya di atas 5W yang menghasilkan panas cukup tinggi selama proses pemotongan (Powell 2017).

Selain menjaga performa sistem, aspek keamanan juga menjadi bagian penting dalam perancangan mesin *laser cutting*. Sistem pengaman umumnya meliputi pelindung berkas laser untuk mencegah paparan langsung terhadap pengguna, saklar darurat (*emergency stop*) yang berfungsi memutus catu daya secara cepat saat terjadi kondisi tidak normal, serta sensor batas (*limit switch*) untuk mencegah pergerakan mekanik melebihi area kerja. Penerapan sistem pendinginan dan keamanan yang memadai tidak hanya meningkatkan keandalan operasi mesin, tetapi juga berperan penting dalam mencegah kecelakaan kerja dan kerusakan sistem secara keseluruhan (Powell 2017).

2.4.5 Mikrokontroler dan Sistem Kontrol

Pusat pengendali sistem pada mesin *laser cutting* berbasis CNC umumnya menggunakan mikrokontroler Arduino UNO yang dipadukan

dengan CNC *Shield* sebagai antarmuka antara sistem kontrol dan driver motor. Arduino berfungsi sebagai pengolah utama yang mengatur koordinasi gerak motor, pengaktifan modul laser, serta sinkronisasi proses pemotongan sesuai parameter yang telah ditentukan. CNC *Shield* mempermudah integrasi antara mikrokontroler dengan *driver stepper* motor, *limit switch*, dan modul laser, sehingga sistem kontrol menjadi lebih ringkas dan terstruktur (Gershenfeld 2005)

Arduino UNO menerima perintah pemotongan dalam bentuk G-code yang dikirimkan dari komputer melalui koneksi USB. G-code merupakan bahasa pemrograman standar pada mesin CNC yang berisi instruksi gerak, kecepatan, serta pengaturan proses pemotongan. Perintah ini kemudian dieksekusi oleh firmware GRBL yang berjalan pada mikrokontroler. Firmware GRBL berfungsi menerjemahkan perintah G-code menjadi sinyal logika berupa pulsa langkah (*step*) dan arah (*direction*) yang dikirimkan ke driver motor untuk menggerakkan motor stepper sesuai lintasan potong yang diinginkan (Ibrahim 2011; Gershenfeld 2005).

Selain mengatur pergerakan motor, sistem kontrol berbasis Arduino dan GRBL juga memungkinkan pengaturan parameter proses seperti kecepatan pemotongan, percepatan, serta daya laser melalui modulasi sinyal keluaran. Fleksibilitas ini menjadikan sistem kontrol berbasis mikrokontroler banyak digunakan pada mesin *laser cutting* skala kecil hingga menengah, khususnya dalam bidang pendidikan, penelitian, dan prototyping, karena bersifat terbuka (*open source*), mudah diprogram, dan memiliki biaya implementasi yang relatif rendah (Gershenfeld 2005; Groover 2010a).

2.5 Sistem Kontrol dan Perangkat Lunak pada Mesin *Laser Cutting*

Sistem kontrol pada mesin *laser cutting* berperan penting dalam mengoordinasikan pergerakan mekanik, pengaktifan laser, serta interpretasi jalur potong digital. Sistem ini terdiri dari mikrokontroler sebagai pusat pengendali, firmware pengolah G-code, serta perangkat lunak antarmuka pengguna yang berfungsi mengirimkan perintah dari komputer ke mesin.

Melalui sistem kontrol dan perangkat lunak tersebut, proses pemotongan dapat dilakukan secara otomatis dan berulang dengan tingkat presisi yang tinggi, karena seluruh parameter pemotongan dan lintasan gerak dieksekusi berdasarkan perintah numerik yang telah diprogram. Integrasi yang baik antara perangkat keras dan perangkat lunak memungkinkan kualitas serta akurasi hasil pemotongan tetap terjaga secara konsisten (Groover 2010a; Steen and Mazumder 2010)

2.5.1 Mikrokontroler dan Firmware

Mikrokontroler merupakan inti dari sistem kontrol pada mesin *laser cutting* yang berfungsi mengoordinasikan pergerakan mekanik dan pengoperasian laser secara presisi. Mikrokontroler menerima data jalur pemotongan dalam bentuk G-code dari komputer, kemudian menerjemahkannya menjadi sinyal digital untuk mengendalikan motor stepper serta status aktif laser (Ibrahim 2011). Pada mesin *laser cutting* skala kecil hingga menengah, mikrokontroler yang banyak digunakan adalah Arduino UNO yang dikombinasikan dengan CNC Shield sebagai antarmuka ke driver motor, karena kemudahan integrasi, biaya yang relatif rendah, dan dukungan sistem open-source yang luas (Groover 2010a)

Firmware yang umum digunakan pada sistem berbasis Arduino adalah GRBL (G-code Interpreter for Arduino), yaitu firmware open-source yang dirancang untuk mengolah perintah G-code secara real time. GRBL mampu mengendalikan sistem hingga tiga sumbu (X, Y, dan Z) menggunakan motor stepper, serta bekerja dengan sistem koordinat absolut dan relatif (Gershenfeld 2005). Selain itu, pengaturan parameter seperti *feedrate*, percepatan gerak, serta pembatasan area kerja menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas dan konsistensi proses pemotongan, terutama pada aplikasi *laser cutting* yang menuntut ketelitian tinggi. Pendekatan firmware berbasis sistem tertanam (*embedded system*) ini terbukti efektif dalam meningkatkan performa mesin CNC skala kecil hingga menengah, sekaligus memberikan fleksibilitas bagi pengguna dalam melakukan penyesuaian sistem sesuai kebutuhan aplikasi (Wu et al. 2017).

GRBL menerjemahkan perintah G-code menjadi sinyal pulsa langkah (step) dan arah (direction) yang dikirimkan ke driver motor, sekaligus mengatur intensitas laser sesuai kebutuhan proses pemotongan atau engraving. Penggunaan firmware open-source seperti GRBL memberikan fleksibilitas tinggi dalam pengembangan sistem kontrol, memungkinkan modifikasi parameter dan fitur sesuai kebutuhan aplikasi pendidikan, penelitian, maupun industri skala kecil (Monk 2013). Pendekatan ini sejalan dengan perkembangan sistem CNC modern yang menekankan otomasi, keterbukaan sistem, dan efisiensi biaya.

2.5.2 Perangkat Lunak Antarmuka (User Interface)

Untuk menghubungkan komputer pengguna dengan mikrokontroler, digunakan perangkat lunak antarmuka seperti LaserGRBL atau Universal G-code Sender (UGS). LaserGRBL dirancang khusus untuk mesin laser dan memiliki fitur pratinjau jalur potong (*preview*), pengaturan kecepatan dan kekuatan laser, serta manajemen file G-code. Perangkat lunak ini juga mendukung pengeditan file secara langsung dan dapat membaca file dalam format DXF, SVG, dan JPEG (Monk 2013)

Proses kerja dimulai dari desain vektor atau bitmap yang dibuat di perangkat lunak CAD (misalnya Inkscape atau CorelDRAW), kemudian file tersebut dikonversi ke G-code menggunakan *slicer* atau plugin konversi. G-code yang dihasilkan kemudian dimuat ke LaserGRBL atau UGS untuk dikirim ke mikrokontroler.

2.5.3 Integrasi Sistem

Kolaborasi antara sistem perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) merupakan faktor kunci yang menentukan efektivitas dan kinerja mesin *laser cutting* secara keseluruhan. Integrasi yang baik antara komponen elektronik seperti mikrokontroler, driver motor, modul laser, dan sensor dengan perangkat lunak pengendali memungkinkan mesin merespons perintah secara cepat dan presisi. Responsivitas sistem, akurasi lintasan pemotongan, serta kestabilan output daya laser sangat dipengaruhi oleh

kemampuan firmware dalam memproses dan mengelola perintah G-code secara real-time, termasuk pengaturan parameter pemotongan seperti kecepatan gerak (*feedrate*), percepatan (*acceleration*), dan tingkat daya laser. Ketidaksesuaian parameter atau keterlambatan pemrosesan data dapat menyebabkan cacat potong, ketidaktepatan dimensi, hingga penurunan kualitas hasil pemotongan secara keseluruhan (Groover 2010a).

Selain itu, penggunaan sistem berbasis *open-source* dalam pengembangan mesin *laser cutting* memberikan fleksibilitas yang tinggi bagi peneliti dan pengembang untuk melakukan modifikasi maupun optimalisasi sistem kontrol. Firmware dan perangkat lunak *open-source* memungkinkan akses langsung ke kode sumber sehingga pengguna dapat menyesuaikan algoritma kontrol gerak, menambahkan fitur keselamatan, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Pendekatan ini tidak hanya mempercepat proses inovasi, tetapi juga mendorong kolaborasi pengetahuan antar komunitas pengembang dan akademisi dalam pengembangan teknologi manufaktur digital (Gershenfeld 2005; Jones et al. 2011)

2.6 Material pada Mesin *Laser Cutting*

Pemilihan material merupakan aspek fundamental dalam perancangan dan pengoperasian sistem *laser cutting* karena sangat berpengaruh terhadap efektivitas proses pemotongan dan kualitas hasil akhir. Setiap material memiliki sifat fisik, mekanik, dan termal yang berbeda, seperti titik leleh, konduktivitas panas, reflektivitas terhadap panjang gelombang laser, serta kemampuan menyerap energi radiasi. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan respon material terhadap sinar laser juga bervariasi, sehingga memerlukan penyesuaian parameter pemotongan yang tepat agar diperoleh hasil potongan yang presisi dan minim cacat. Secara umum, material yang diproses dengan teknologi *laser cutting* dapat diklasifikasikan menjadi material non-logam dan material logam, yang masing-masing memiliki mekanisme interaksi termal yang berbeda terhadap energi laser. Material non-logam seperti akrilik, kayu, kain, dan kertas cenderung memiliki daya serap

energi laser yang tinggi dan titik leleh relatif rendah, sehingga dapat dipotong dengan daya laser yang lebih kecil. Sebaliknya, material logam seperti baja, aluminium, dan stainless steel memiliki konduktivitas termal serta reflektivitas yang lebih tinggi, sehingga membutuhkan daya laser yang lebih besar dan kontrol parameter yang lebih ketat. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik material terhadap laser menjadi sangat penting untuk menentukan jenis laser, parameter pemotongan, serta strategi proses yang sesuai dalam sistem *laser cutting* agar diperoleh hasil yang optimal, aman, dan efisien (Steen and Mazumder 2010; Dubey and Yadava 2008)

2.6.1 Material Non-Logam

Material non-logam merupakan jenis bahan yang paling umum digunakan pada mesin *laser cutting* berbasis CO₂ maupun laser diode karena memiliki daya serap energi laser yang relatif tinggi dan tidak memerlukan daya pemotongan sebesar material logam. Karakteristik material non-logam yang umumnya memiliki titik leleh rendah serta konduktivitas termal kecil memungkinkan proses pemotongan berlangsung lebih efisien dan presisi. Beberapa material non-logam yang sering digunakan antara lain sebagai berikut.

1. Akrilik Polymethyl Methacrylate (PMMA)

Akrilik merupakan material polimer transparan yang sangat populer dalam aplikasi *laser cutting* karena mampu menghasilkan tepi potongan yang halus, jernih, dan presisi tanpa memerlukan proses finishing tambahan. Interaksi antara sinar laser CO₂ dan material akrilik menyebabkan proses pemotongan berlangsung melalui mekanisme pelelehan dan penguapan material secara terkendali, sehingga menghasilkan kualitas permukaan yang baik. Sifat optik dan termal akrilik menjadikannya banyak digunakan dalam pembuatan display, papan nama, prototipe produk, dan kerajinan berbasis desain presisi (Steen and Mazumder 2010).

2. Kayu (triplek, MDF, kayu lapis)

Kayu merupakan material organik yang mudah diproses menggunakan

mesin *laser cutting*, terutama dengan laser CO₂. Proses pemotongan kayu terjadi melalui mekanisme pembakaran dan penguapan material akibat energi panas dari laser. Kualitas hasil potong sangat dipengaruhi oleh jenis kayu, kepadatan serat, ketebalan material, serta kadar air yang terkandung di dalamnya. Kayu dengan kadar air tinggi atau kepadatan serat yang tidak merata dapat menyebabkan hasil potongan kurang konsisten dan meningkatkan risiko terbentuknya arang (*char*) pada tepi potongan (Dubey and Yadava 2008)

3. Karton, kertas, kulit, dan kain

Material ringan seperti karton, kertas, kulit, dan kain umumnya memerlukan daya laser yang rendah untuk proses pemotongan. Sifat material yang tipis dan mudah terbakar menuntut pengaturan parameter pemotongan yang cermat, terutama pada daya laser dan kecepatan gerak, agar tidak terjadi pembakaran berlebih atau kerusakan material. Dengan pengaturan parameter yang tepat, *laser cutting* mampu menghasilkan potongan yang rapi dan detail, sehingga material ini banyak digunakan dalam industri kemasan, tekstil, dan produk kreatif (Gershenfeld 2005).

4. Plastik (ABS, PVC, PET)

Plastik merupakan kelompok material non-logam yang penggunaannya dalam proses *laser cutting* memerlukan perhatian khusus. Beberapa jenis plastik seperti ABS dan PET dapat dipotong menggunakan laser dengan hasil yang cukup baik, meskipun kualitas tepi potong sangat bergantung pada parameter proses dan ketebalan material. Namun, plastik jenis PVC tidak direkomendasikan untuk dipotong dengan laser karena menghasilkan gas klorin yang bersifat toksik dan korosif, yang dapat merusak komponen mesin serta membahayakan keselamatan operator. Oleh karena itu, pemilihan jenis plastik yang aman dan sesuai menjadi faktor penting dalam pengoperasian mesin *laser cutting* (Powell 2017).

2.6.2 Material Logam

Pemotongan material logam dengan teknologi laser umumnya memerlukan sumber laser berdaya tinggi dan memiliki panjang gelombang yang lebih pendek, seperti *fiber laser*, agar energi laser dapat diserap secara efektif oleh permukaan material. Sebagian besar logam memiliki tingkat reflektansi yang tinggi terhadap panjang gelombang laser CO₂, sehingga penggunaan laser CO₂ menjadi kurang efisien, terutama pada material dengan reflektivitas tinggi seperti aluminium dan tembaga. Oleh karena itu, pemilihan jenis laser, pengaturan daya, kecepatan pemotongan, serta penggunaan gas bantu menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas hasil pemotongan logam. Beberapa jenis material logam yang umum diproses menggunakan mesin *laser cutting* antara lain sebagai berikut:

1. *Stainless Steel*

Stainless steel merupakan material logam yang banyak digunakan dalam industri manufaktur, otomotif, dan peralatan medis karena ketahanan korosi dan kekuatan mekaniknya yang tinggi. Material ini relatif mudah dipotong menggunakan *fiber laser* karena memiliki tingkat penyerapan energi laser yang lebih baik dibandingkan logam reflektif lainnya. Dalam proses pemotongan, penggunaan gas bantu seperti nitrogen atau oksigen sangat berperan dalam menjaga kualitas tepi potongan. Nitrogen umumnya digunakan untuk menghasilkan tepi potong yang bersih tanpa oksidasi, sedangkan oksigen dapat meningkatkan kecepatan potong melalui reaksi eksotermik, namun berpotensi menimbulkan lapisan oksida pada permukaan potongan (Powell 2017).

2. Aluminium

Aluminium merupakan material logam dengan reflektansi yang sangat tinggi terhadap cahaya laser, terutama pada panjang gelombang yang digunakan oleh laser CO₂. Karakteristik ini menyebabkan efisiensi penyerapan energi laser menjadi rendah dan meningkatkan risiko pantulan balik (*back reflection*) yang dapat merusak sumber laser. Oleh karena itu, pemotongan aluminium umumnya dilakukan menggunakan

fiber laser dengan daya tinggi dan pengaturan kecepatan potong yang optimal. Selain itu, penggunaan gas bantu seperti nitrogen diperlukan untuk mencegah oksidasi serta menghasilkan kualitas tepi potong yang lebih halus dan presisi (Powell 2017).

3. Baja karbon

Baja karbon merupakan salah satu material logam yang paling umum diproses menggunakan teknologi *laser cutting* karena ketersediaannya yang luas dan sifat mekanik yang baik. Material ini dapat dipotong menggunakan laser CO₂ maupun *fiber laser*, tergantung pada ketebalan material dan spesifikasi mesin yang digunakan. Pada pemotongan baja karbon, gas bantu oksigen sering dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi pemotongan melalui reaksi oksidasi yang menghasilkan tambahan panas. Metode ini memungkinkan pemotongan material dengan ketebalan yang lebih besar, meskipun dapat menimbulkan lapisan oksida pada tepi potongan yang memerlukan proses finishing lanjutan (Dubey and Yadava 2008).

2.6.3 Karakteristik Material terhadap Laser

Respons suatu material terhadap proses pemotongan laser dipengaruhi oleh sejumlah parameter fisik dan termal yang menentukan bagaimana energi laser diserap, disebarkan, dan diubah menjadi panas pada area potong. Perbedaan karakteristik ini menyebabkan setiap material memerlukan pengaturan jenis laser dan parameter pemotongan yang berbeda agar diperoleh hasil yang optimal. Beberapa parameter utama yang memengaruhi interaksi material dengan laser adalah sebagai berikut :

1. Koefisien absorpsi terhadap panjang gelombang laser

Koefisien absorpsi menunjukkan kemampuan material dalam menyerap energi laser pada panjang gelombang tertentu. Setiap material memiliki tingkat absorpsi yang berbeda terhadap panjang gelombang laser CO₂ ($\pm 10,6 \mu\text{m}$) dan fiber laser ($\pm 1,06 \mu\text{m}$). Material dengan koefisien absorpsi tinggi akan menyerap lebih banyak energi laser, sehingga proses pemotongan menjadi lebih efisien dan membutuhkan daya yang

lebih rendah. Sebaliknya, material dengan reflektivitas tinggi, seperti aluminium dan tembaga, cenderung memantulkan sebagian besar energi laser, sehingga memerlukan daya lebih besar dan kontrol proses yang lebih ketat (Steen & Mazumder, 2010).

2. Titik leleh dan titik didih

Titik leleh dan titik didih menentukan energi minimum yang dibutuhkan untuk mengubah fase material dari padat menjadi cair atau gas selama proses pemotongan. Material dengan titik leleh dan titik didih yang relatif rendah, seperti plastik dan akrilik, dapat dipotong dengan daya laser yang lebih kecil dibandingkan material logam. Sebaliknya, logam dengan titik leleh tinggi memerlukan laser berdaya besar serta waktu paparan yang cukup agar proses pemotongan dapat berlangsung secara efektif. Parameter ini sangat berpengaruh terhadap kecepatan potong dan kualitas tepi hasil pemotongan (Dubey & Yadava, 2008).

3. Konduktivitas termal dan difusivitas termal

Konduktivitas termal menunjukkan kemampuan material dalam menghantarkan panas, sedangkan difusivitas termal menggambarkan seberapa cepat panas menyebar di dalam material. Material dengan konduktivitas dan difusivitas termal rendah cenderung lebih mudah dipotong karena energi laser dapat terkonsentrasi pada area potong tanpa cepat menyebar ke bagian lain. Kondisi ini membantu menghasilkan celah potong (*kerf*) yang sempit serta zona terpengaruh panas (*heat affected zone*) yang minimal. Sebaliknya, material dengan konduktivitas termal tinggi memerlukan daya laser yang lebih besar dan pengaturan kecepatan yang tepat untuk menghindari penurunan kualitas potongan (Steen & Mazumder, 2010).

4. Kandungan bahan kimia (resin, gas, zat aditif)

Kandungan bahan kimia seperti resin, gas terperangkap, atau zat aditif di dalam material juga memengaruhi respons material terhadap laser. Pada material non-logam seperti kayu dan plastik, kandungan resin atau

zat aditif tertentu dapat meningkatkan risiko pembakaran, pembentukan asap berlebih, atau emisi gas berbahaya selama proses pemotongan. Selain itu, reaksi kimia yang terjadi akibat pemanasan laser dapat memengaruhi kualitas tepi potongan dan keselamatan kerja. Oleh karena itu, karakteristik kimia material perlu dipertimbangkan dalam pemilihan material dan pengaturan parameter *laser cutting* (Gershenfeld, 2005).

2.7 Pengujian Kekasaran

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) merupakan karakteristik topografi permukaan yang menggambarkan penyimpangan mikro dari profil permukaan ideal akibat proses manufaktur. Pada proses pemotongan laser, permukaan hasil potongan tidak pernah benar-benar sempurna, melainkan memiliki ketidakrataan kecil akibat interaksi energi laser dengan material yang menyebabkan pelelehan dan penguapan secara terkontrol. Dalam pengujian kekasaran, terdapat dua parameter utama yaitu Ra (*Roughness Average*) yang menunjukkan nilai rata-rata deviasi profil permukaan, dan Rz (*Roughness Maximum*) yang menunjukkan jarak vertikal antara puncak tertinggi dan lembah terdalam. Semakin kecil nilai Ra, maka semakin halus permukaan hasil pemotongan (Alsaadawy et al., 2024).