

**PENGARUH PARAMETER PEMOTONGAN DAN PENGUKIRAN LASER
CO₂ TERHADAP LEBAR GARITAN DAN KETERBASAHAN KAYU
SENGON (*Falcataria moluccana*) MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI**

(Skripsi)

Oleh

**Raden Aji
2114151029**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGARUH PARAMETER PEMOTONGAN DAN PENGUKIRAN LASER CO₂ TERHADAP LEBAR GARITAN DAN KETERBASAHAN KAYU SENGON (*Falcataria moluccana*) MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI

Oleh

Raden Aji

Laser CO₂ merupakan teknologi modern yang banyak dimanfaatkan dalam pemrosesan material kayu karena presisi dan efisiensinya. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh parameter pemotongan dan pengukiran laser CO₂ terhadap lebar garitan (*kerf*) serta keterbasahan kayu sengon (*Falcataria moluccana*) menggunakan metode Taguchi. Metode Taguchi dalam penelitian laser CO₂ menggunakan *Orthogonal Array* sebagai alat rancangan eksperimen untuk mengatur variasi parameter pemotongan secara sistematis dan efisien, sehingga pengaruh masing-masing parameter seperti daya laser, kecepatan, dan arah pemotongan terhadap lebar garitan dan keterbasahan kayu sengon dapat dianalisis secara optimal dengan jumlah percobaan minimal. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan rancangan *Orthogonal Array* L9 (3²). Hasil menunjukkan bahwa daya dan kecepatan pemotongan berpengaruh signifikan terhadap *kerf* dan morfologi permukaan. Daya tinggi menghasilkan kedalaman potong lebih besar, sedangkan kecepatan lebih tinggi mempersempit *kerf*. Arah pemotongan juga berpengaruh, dengan potongan tangensial cenderung lebih lebar dibandingkan longitudinal. Analisis warna menunjukkan $\Delta E > 12$ pada seluruh perlakuan, menandakan perubahan total akibat karbonisasi. Kekasaran permukaan menurun dibandingkan kontrol dengan variasi tergantung kombinasi daya dan kecepatan. Uji keterbasahan menunjukkan perubahan sifat permukaan dari hidrofilik menjadi hidrofobik, dengan sudut kontak meningkat dari 62,7° (kontrol) hingga 119,81° pada perlakuan 15 W dan 6 mm/s. Berdasarkan metode Taguchi, secara keseluruhan, kombinasi daya 15 W dengan kecepatan 6 mm/s memberikan hasil optimal pada pengukiran dengan keterbasahan tertinggi, sedangkan pemotongan optimal diperoleh pada daya 50 W dan kecepatan 2 mm/s.

Kata kunci: Laser CO₂, kayu sengon, *kerf*, keterbasahan, metode Taguchi

ABSTRACT

THE EFFECT OF CUTTING AND ENGRAVING PARAMETERS OF CO₂ LASER ON THE KERF WIDTH AND WETTABILITY OF SENGON WOOD (*Falcataria moluccana*) USING THE TAGUCHI METHOD

By

Raden Aji

CO₂ lasers are a modern technology widely used in wood material processing due to their precision and efficiency. This study aims to analyze the effect of CO₂ laser cutting and engraving parameters on the kerf width and wettability of sengon wood (*Falcataria moluccana*) using the Taguchi method. The Taguchi method in CO₂ laser research uses *Orthogonal array* as an experimental design tool to systematically and efficiently regulate cutting parameter variations, so that the influence of each parameter, such as laser power, speed, and cutting direction, on the kerf width and moisture content of sengon wood can be analyzed optimally with a minimum number of experiments. The research was conducted experimentally with an L9 (3³) *Orthogonal array* design. The results showed that cutting power and speed had a significant effect on kerf and surface morphology. High power resulted in greater cutting depth, while higher speed narrowed the kerf. The cutting direction also had an effect, with tangential cuts tending to be wider than longitudinal cuts. Color analysis showed $\Delta E > 12$ in all treatments, indicating a total change due to carbonization. Surface roughness decreased compared to the control, with variations depending on the combination of power and speed. Wettability tests showed a change in surface properties from hydrophilic to hydrophobic, with the contact angle increasing from 62.7° (control) to 119.81° in the 15 W and 6 mm/s treatment. Based on the Taguchi method, overall, the combination of 15 W power and 6 mm/s speed provided optimal results in engraving with the highest wettability, while optimal cutting was obtained at 50 W power and 2 mm/s speed.

Keywords: CO₂ laser, sengon wood, kerf, wettability, Taguchi method

**PENGARUH PARAMETER PEMOTONGAN DAN PENGUKIRAN LASER
CO₂ TERHADAP LEBAR GARITAN DAN KETERBASAHAN KAYU
SENGON (*Falcataria moluccana*) MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI**

Oleh

Raden Aji

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA KEHUTANAN**

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi

**: PENGARUH PARAMETER PEMOTONGAN
DAN PENGUKIRAN LASER CO₂
TERHADAP LEBAR GARITAN DAN
KETERBASAHAN KAYU SENGON
(*Falcataria moluccana*) MENGGUNAKAN
METODE TAGUCHI**

Nama

: Raden Aji

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2114151029

Program Studi

: Kehutanan

Fakultas

: Pertanian



1. Komisi Pembimbing

Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si.
NIP 197402222003121001

Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.
NIP 197911142009121001

2. Ketua Jurusan Kehutanan

Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM.
NIP 197310121999032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si.**

Sekretaris : **Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.**

Anggota : **Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM.**

2. Dekan Fakultas Pertanian

Dr. Ir. Kuswanta Butas Hidayat, M.P.
NIP 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **21 Agustus 2025**

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Raden Aji
NPM : 2114151029
Jurusan : Kehutanan
Alamat : Jl. Pratu Umar no. 193 Kel. Bumi Agung, Kec. Kalianda,
Kab. Lampung Selatan

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sungguh-sungguh, bahwa skripsi saya yang berjudul:

**“PENGARUH PARAMETER PEMOTONGAN DAN PENGUKIRAN
LASER CO₂ TERHADAP LEBAR GARITAN DAN KETERBASAHAN
KAYU SENGON (*Falcataria moluccana*) MENGGUNAKAN METODE
TAGUCHI”**

Adalah benar karya saya sendiri yang saya susun dengan mengikuti norma dan etika akademik yang berlaku. Selanjutnya, saya juga tidak keberatan apabila sebagian atau seluruh data pada skripsi ini digunakan oleh dosen dan/atau program studi untuk kepentingan publikasi. Jika di kemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar sarjana maupun tuntutan hukum.

Bandar Lampung,
Yang membuat pernyataan



Raden Aji
NPM 2114151029

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Raden Aji, lahir di Kalianda, Lampung Selatan, 22 April 2003. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Raden Riza Ahmadi dan Ibu Andariyah. Penulis menempuh pendidikan di TK Aisyiah Bustanul Atfal Kalianda tahun 2008-2009, SDN Bumi Agung Kelurahan Kalianda tahun 2009-2015, SMPN 1 Kalianda tahun 2015-2018, dan SMAN 1 Kalianda tahun 2018-2021. Selama masa pendidikan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi. Penulis tergabung dalam Organisasi Rohani Islam dan Pramuka SMPN 1 Kalianda dan SMAN 1 Kalianda. Selain itu, penulis juga adalah Purna Pelayaran Lingkar Nusantara (PELANTARA) 9 Sail Nias 2019. Pada tahun 2021 penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di berbagai organisasi, di antaranya Forum Komunikasi KIP Kuliah Universitas Lampung sebagai Koordinator Fakultas Pertanian sejak 2021, serta di Himasyilva Unila sebagai pengurus bidang penelitian dan pengembangan organisasi pada tahun 2024. Selain itu, penulis berperan aktif di Koperasi Konsumen Mahasiswa Unila, baik sebagai Ketua Pelaksana Temu Kader, Koordinator Perlengkapan *Coop Education Festival* (Counfest), hingga *Master of Ceremony* Jambore Koperasi Nasional 2023. Penulis juga aktif sebagai asisten dosen pada mata kuliah Agroforestri (Semester 6) dan Pemanenan Hasil Hutan (Semester 7). Kegiatan pengabdian masyarakat yang pernah dilakukan penulisan adalah sosialisasi pemanfaatan limbah organik menjadi *ecoenzym* di Desa Hanura, Pesawaran (2023) dan Desa Kalipapan, Way Kanan (2024).

Kegiatan akademik yang pernah diikuti penulis adalah menjadi pemakalah pada The II International Korkut Ata Scientific Researches Conference (Turki,

2023) dengan topik *Bioprospeksi Tumbuhan Bawah di Kebun Raya Bogor*, serta pada The 7th International Cukurova Agriculture and Veterinary Congress (Turki, 2024) dengan topik *Peran Agroforestri dalam Peningkatan Pendapatan Masyarakat*. Penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata di Desa Kalipapan, Kecamatan Negeri Agung, Kabupaten Way Kanan. Penulis juga mengikuti kegiatan Praktik Umum selama 20 hari di Hutan Pendidikan Universitas Gadjah Mada yaitu KHDTK Getas Kecamatan Kradenan, Blora, Jawa Tengah dan KHDTK Wanagama, Jawa Tengah. Penulis memiliki nilai 1.044 pada Surat Keterangan Pendamping Ijazah dengan kriteria unggul.

SANWACANA

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh Parameter Pemotongan dan Pengukiran Laser CO₂ terhadap Lebar Garitan dan Keterbasahan Kayu Sengon (*Falcataria Moluccana*) menggunakan Metode Taguchi” dapat diselesaikan dengan baik sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Kehutanan di Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Penulisan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan, petunjuk, serta dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak, sehingga penulis mengucapkan rasa hormat dan terimakasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM. selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
4. Bapak Prof. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut, M.Si. selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran kepada penulis serta motivasi dalam proses penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, arahan, nasihat serta motivasi dalam proses penyelesaian skripsi ini.
6. Ibu Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM. selaku dosen penguji, yang telah memberikan kritik, arahan, saran, serta dorongan motivasi kepada penulis.

7. Bapak Dr. Rudi Hilmanto, S.Hut., M.Si. selaku pembimbing akademik, yang senantiasa memberikan arahan dan dukungan kepada penulis selama masa studi.
8. Seluruh bapak dan ibu dosen jurusan kehutanan yang telah memberikan wawasan dan ilmu pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan dan staff administrasi Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
9. Kepala Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Kepala Laboratorium Metrologi Industri, Kepala Laboratorium Ilmu Hama Tumbuhan, dan Kepala Laboratorium Zoologi yang telah memberikan izin dalam penggunaan fasilitas dan pelaksanaan penelitian ini.
10. Orang tua penulis yaitu Bapak Raden Riza Ahmadi dan Ibu Andariyah yang selalu memberikan doa, kasih sayang, perhatian, nasihat, arahan, semangat, serta dukungan moril maupun materil sehingga penulis mampu mencapai tahap ini. Terima kasih bapak dan ibu karena telah menjadi alasan penulis ingin segera menyelesaikan perkuliahan.
11. Kepada kakak penulis Rifda Naila Safitri, S.Kep., Ns. yang selalu menyemangati penulis dan memberikan bantuan dalam segala hal, serta arahan dan nasihat selama perkuliahan penulis.
12. Adik penulis Rasyid Al-Kautsar yang selalu menemani penulis dan menjadi alasan penulis bersemangat menyelesaikan perkuliahan, serta keluarga Thamrin yang banyak memberi motivasi supaya penulis menjadi orang sukses dikemudian hari, Aamiin..
13. Tim THH Angkatan 2021 (Fania, Faiz, Anom, dan Izzu) yang telah menemani dan memberikan bantuan kepada penulis selama pengambilan data skripsi.
14. Kak Gavra, Kak Syahril, Rifdah, dan Kabinet INA yang banyak sekali memberikan pelajaran hidup dan semangat serta dukungan selama penulis aktif di Kopma Unila.
15. Teman dekat penulis (Danang, Fauzan, Augi, Tristin) yang memberikan dukungan dan semangat kepada penulis dari awal perkuliahan hingga lulus bersama.

16. Saudara seperjuangan angkatan 2021 (LABORIOSA) dan keluarga besar Himasyilva Universitas Lampung.
17. Forkom KIP Kuliah, Pramuka Unila, Kopma Unila, dan Himasyilva sebagai wadah organisasi penulis selama berkuliah di Universitas Lampung.
18. Teman teman TB, Ambis sambil arisan, dan grub *circle* kecil lainnya yang telah menemani penulis selama perkuliahan.
19. Seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu oleh penulis yang telah banyak membantu penulis selama melakukan perkuliahan dan proses skripsi ini.
20. Terima kasih kepada diri saya sendiri yang telah bertahan hingga saat ini, bertanggung jawab, dan selalu berusaha keras untuk melewati dan menikmati proses panjang skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, tetapi penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan berguna bagi pembaca.

Bandar Lampung, 21 Agustus 2025
Penulis

Raden Aji

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
 I. PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang dan Masalah	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Manfaat	3
1.4 Kerangka Pemikiran	3
1.5 Hipotesis	6
 II. TINJAUAN PUSTAKA	 7
2.1 Hutan Tanaman Industri	7
2.2 Kayu Sengon (<i>Falcataria moluccana</i>)	8
2.3 Struktur Kayu Sengon.....	11
2.4 Garitan (<i>Kerf</i>).....	13
2.5 Laser	13
2.6 Jenis-Jenis Laser	14
2.6.1 Laser Fiber	15
2.6.2 Laser Nd:YAG (<i>Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet</i>) .	15
2.6.3 Laser DPSS(<i>Diode-Pumped Solid State</i>)	15
2.6.4 Laser He-Ne (<i>Helium Neon</i>)	16
2.6.5 Laser CO ₂ (Karbon Dioksida).....	16
2.7 Bagian-Bagian Laser CO ₂	17
 III. METODOLOGI PENELITIAN	 19
3.1 Waktu dan Tempat.....	19
3.2 Alat dan Bahan	19
3.3 Rancangan Penelitian.....	20
3.3.1 Metode Taguchi	20
3.3.2 Matriks Orthogonal Array.....	20
3.3.3 Analisis S/N Ratio (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)	21
3.4 Parameter Penelitian	21
3.5 Mekanisme Pelaseran Papan Kayu	22
3.6 Prosedur Penelitian	22

3.6.1	Persiapan Alat dan Pengaturan Mesin Laser CO ₂	22
3.6.2	Persiapan Bahan.....	24
3.6.3	Pelaseran Papan Kayu Sengon (<i>Falcataria moluccana</i>)	24
3.7	Perancangan Desain Percobaan	25
3.8	Pengujian Hasil Laser	27
3.8.1	Pengukuran <i>Kerf</i>	27
3.8.2	Uji Keterbasahan.....	28
3.8.3	Uji Perubahan Warna	29
3.8.4	Uji Kekasaran Kayu	31
3.9	Analisis Data.....	31
3.9.1	Analisis Statistik Deskriptif.....	31
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1	Kadar Air	32
4.2	Kedalaman dan Lebar Garitan	32
4.2.1	Kedalaman Longitudinal.....	34
4.2.2	Kedalaman Tangensial.....	35
4.2.3	Lebar Longitudinal.....	37
4.2.4	Lebar Tangensial.....	38
4.3	Perubahan Warna Kayu Sengon	40
4.4	Kekasaran Kayu Sengon.....	44
4.5	Keterbasahan Kayu	46
V.	SIMPULAN DAN SARAN	49
5.1	Kesimpulan.....	49
5.2	Saran	49
	DAFTAR PUSTAKA	50
	LAMPIRAN	56

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Rancangan Eksperimen Pemotongan	19
2. Rancangan Eksperimen Pengukiran.....	19
3. Kriteria Evaluasi Perubahan Warna Keseluruhan (ΔE)	29
4. Kadar Air Kayu Sengon (<i>Falcataria moluccana</i>).....	32
5. Kedalaman dan Lebar Garitan	33
6. Nilai Perubahan Warna Kayu Sengon setelah Pelaseran	40
7. Keterbasahan (<i>Wettability</i>) Kayu	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka Pemikiran.....	4
2. Produksi Kayu Bulat Tahun 2018-2023 pada Tanaman Sengon	7
3. Kayu Sengon	9
4. Laser CO ₂ CNC LS6040 50 W	22
5. Cara Kerja Pemotongan Laser	23
6. Desain Percobaan Metode Taguchi Menggunakan Minitab 22	24
7. Pengisian Tipe Desain dan Jumlah Faktor	24
8. Desain OA L9 3 ²	25
9. Desain Percobaan pada Perangkat Lunak Minitab 22.....	25
10. Tabel Data Awal	26
11. Pengukuran Lebar Garitan	27
12. Pengukuran Sudut Kontak (θ)	27
13. <i>Colorimeter Amtast</i> AMT507	28
14. <i>Surface Roughness Tester</i>	30
15. Hasil Pemotongan Menggunakan Laser CO ₂ pada Arah Potong Longitudinal dan Tangensial	31
16. Grafik Kedalaman dan Lebar Garitan	32
17. Perbandingan Daya dan Kecepatan Pemotongan Laser CO ₂ (Kedalaman Longitudinal)	33
18. S/N Ratio Metode Taguchi (Kedalaman Longitudinal)	34
19. Perbandingan Daya dan Kecepatan Pemotongan Laser CO ₂ (Kedalaman Tangensial)	34
20. S/N Ratio Metode Taguchi (Kedalaman Tangensial)	35
21. Perbandingan Daya dan Kecepatan Pemotongan Laser CO ₂ (Lebar Longitudinal)	36
22. S/N Ratio Metode Taguchi (Lebar Longitudinal)	37
23. Perbandingan Daya dan Kecepatan Pemotongan Laser CO ₂ (Lebar Tangensial)	37
24. S/N Ratio Metode Taguchi (Lebar Tangensial)	38
25. Perubahan Warna Kayu Sengon Setelah Perlakuan Laser CO ₂	40
26. Grafik Perubahan Warna Kayu Sengon	41
27. Kekasaran Permukaan Sebelum dan Sesudah Perlakuan	43
28. S/N Ratio Metode Taguchi (Kekasaran Permukaan)	44
29. Sudut Kontak Sebelum dan Sesudah Perlakuan Laser CO ₂	46
30. S/N Ratio Metode Taguchi (Keterbasahan)	47

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Masalah

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) CO₂ (karbon dioksida) merupakan teknologi modern yang mulai banyak dimanfaatkan di berbagai bidang sejak beberapa dekade terakhir, termasuk pemrosesan material kayu (Rahman, 2022). Teknologi ini menawarkan keunggulan seperti presisi tinggi, efisiensi energi, dan kemampuan menghasilkan pola kompleks dengan detail halus (Eltawahni *et al.*, 2011). Dalam proses pemotongan, laser CO₂ bekerja dengan memancarkan cahaya monokromatik dan koheren melalui stimulasi gas karbon dioksida, yang memungkinkan pemotongan material secara presisi dan minim kerusakan (Amany *et al.*, 2022).

Sebagai salah satu produsen utama produk kayu, Indonesia memiliki potensi besar dalam memanfaatkan teknologi ini untuk meningkatkan nilai tambah produk kayu, terutama dalam mendukung efisiensi proses manufaktur. Data produksi menurut Badan Pusat Statistik (2025) menunjukkan peningkatan signifikan dalam produksi kayu gergajian dari 992.867 m³ pada 2013 menjadi 2.772.613 m³ yang berasal dari perusahaan dengan IUPHHK HA, HTI, dan Perum Perhutani pada 2023, yang mencerminkan peluang besar untuk mengoptimalkan teknologi modern seperti laser CO₂ guna mendukung efisiensi dan nilai tambah dalam pengolahan kayu. Kayu sengon (*Falcataria moluccana*), sebagai salah satu jenis kayu unggulan, banyak digunakan dalam industri karena pertumbuhannya yang cepat, biaya produksi rendah, serta fleksibilitas penggunaannya dalam berbagai produk seperti kayu lapis, kayu gergajian, bubur kayu (*pulp*), kertas, serta limbahnya dapat dibuat menjadi briket arang (Dayadi, 2021; Ridjayanti *et al.*, 2021).

Pemotongan kayu sengon pada industri penggergajian pada umumnya menggunakan metode konvensional yang sering kali menghasilkan kualitas yang

tidak konsisten dan limbah yang signifikan (Nugraha *et al.*, 2024). Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi laser CO₂ dalam pemotongan kayu sengon menawarkan peluang besar dalam meningkatkan efisiensi dan presisi hasil potongan. Lebar garitan (*kerf*) yang sempit, permukaan potong yang halus, serta minimnya deformasi material menjadi keunggulan utama metode ini dibandingkan metode tradisional.

Berbagai penelitian telah dilakukan terkait pemanfaatan laser CO₂ dalam pemrosesan kayu. Rahman (2022) meneliti pengaruh daya laser CO₂ terhadap kekasaran dan warna permukaan kayu sengon serta kayu meranti, menunjukkan bagaimana parameter daya laser memengaruhi karakteristik visual dan tekstur kayu. Assyifa (2023) mengeksplorasi pengaruh kecepatan pemotongan laser CO₂ terhadap lebar garitan (*kerf*) dan kedalaman potong pada kayu *Acacia mangium*, memberikan wawasan tentang hubungan kecepatan pemotongan dengan kualitas hasil. Nugraha (2024), melakukan pengoptimalkan variabel pemotongan laser CO₂ pada kayu lapis sengon menggunakan metodologi permukaan respon, fokus pada identifikasi parameter terbaik untuk meningkatkan efisiensi dan presisi pemotongan.

Penelitian ini melengkapi studi sebelumnya dengan melakukan pendekatan menggunakan metode Taguchi untuk mengoptimalkan daya laser dan kecepatan pemotongan pada kayu sengon. Tidak hanya fokus pada efisiensi pemotongan, penelitian ini juga memprioritaskan analisis mendalam terhadap morfologi permukaan kayu dan pengaruh hasil pelaseran terhadap daya serat air pada permukaan kayu. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi laser CO₂ dalam industri pengolahan kayu, sekaligus membuka potensi penerapan yang lebih luas di sektor manufaktur berbasis kayu.

Berdasarkan uraian latar belakang di atas maka dapat dirumuskan masalah yang terjadi pada pemotongan kayu menggunakan laser CO₂, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh daya laser dan kecepatan pemotongan terhadap hasil pemotongan dan pengukiran kayu sengon.
2. Bagaimana perubahan morfologi dan *kerf* kayu sengon setelah pemotongan menggunakan laser CO₂.

1.2 Tujuan

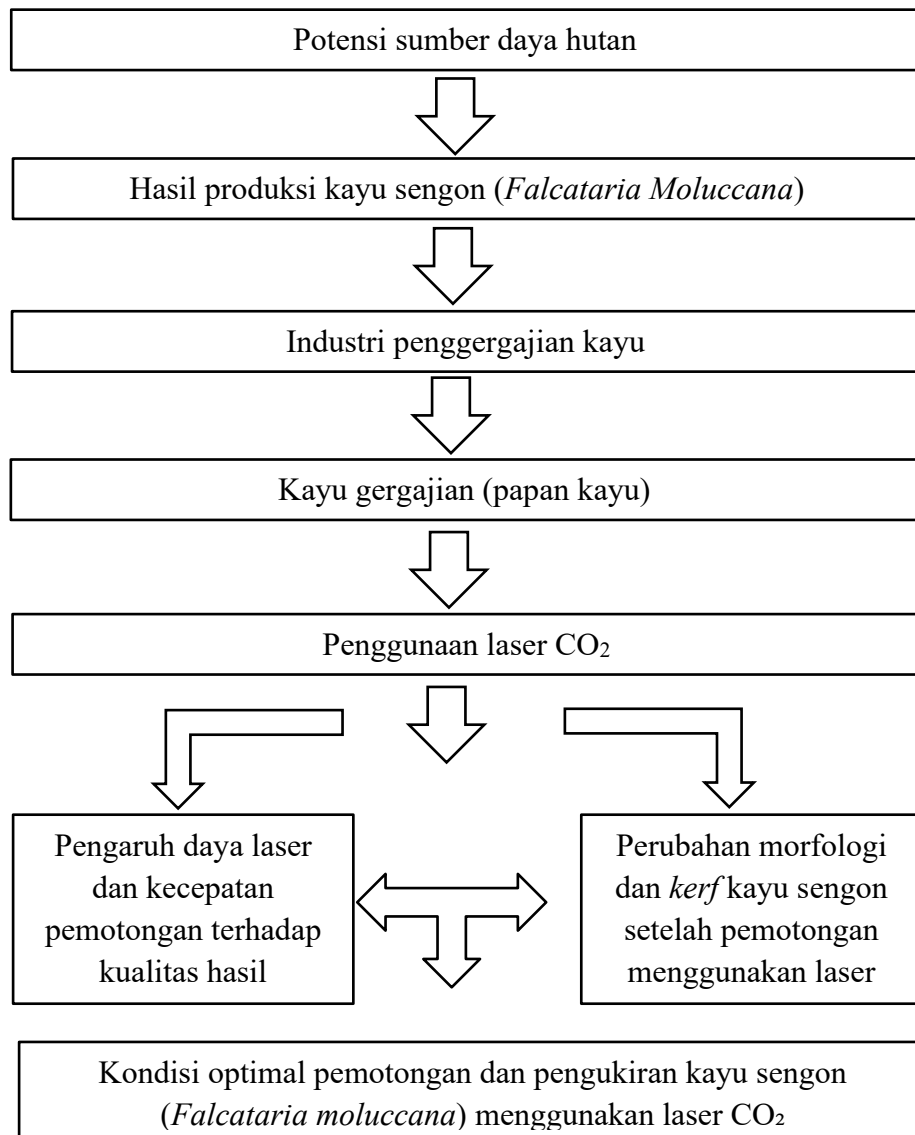
Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh daya dan kecepatan pemotongan laser CO₂ terhadap kerf kayu sengon.
2. Menganalisis hubungan antara parameter pemotongan laser CO₂ dengan perubahan morfologi pada permukaan kayu sengon.
3. Mengevaluasi hasil pemotongan kayu sengon yang dihasilkan berdasarkan kombinasi daya dan kecepatan pemotongan laser CO₂.

1.3 Kerangka Pemikiran

Indonesia memiliki sumber daya hutan yang melimpah, termasuk kayu solid yang banyak dimanfaatkan dalam industri furnitur, kerajinan, dan konstruksi. Salah satu produk kayu solid adalah kayu gergajian. Untuk meningkatkan nilai estetika dan ketahanan permukaan kayu, teknologi laser CO₂ dapat digunakan dengan cara mengoksidasi lapisan atas kayu secara terkendali, menghasilkan pola dekoratif sekaligus meningkatkan ketahanan terhadap gesekan dan goresan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan kualitas permukaan kayu setelah perlakuan laser serta mengamati perubahan morfologinya menggunakan mikroskop stereo. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai dampak pelaseran terhadap sifat fisik dan struktur mikro kayu.

Penggunaan laser CO₂ pada papan kayu sengon menjadi menarik untuk diteliti karena beberapa keunggulannya. Kayu sengon memiliki permukaan yang halus dan rata, memungkinkan pola laser tercetak dengan jelas. Selain itu, sifatnya yang lunak mempermudah proses pelaseran dibandingkan kayu keras. Sebagai material yang murah dan mudah diperoleh, papan kayu sengon dapat menjadi alternatif terjangkau untuk produk kayu berpola laser. Teknologi laser CO₂ juga memungkinkan pemotongan dengan presisi tinggi dan pembuatan pola kompleks dengan mudah, sehingga semakin memperluas potensi aplikasi pada produk kayu.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran

1.4 Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Daya laser yang lebih tinggi menghasilkan kedalaman yang lebih tinggi.
2. Kecepatan pemotongan yang lebih tinggi menghasilkan lebar garitan (*kerf*) yang lebih sempit.
3. Daya, kecepatan laser, dan arah pemotongan kayu mempengaruhi hasil potongan dan pengukiran kayu.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hutan Tanaman Industri

Indonesia memiliki kawasan hutan yang luas dan beragam, termasuk hutan tropis yang kaya akan sumber daya alam dan tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) pada tahun 2020, total luas hutan Indonesia mencapai 120,6 juta ha atau sekitar 63% dari total daratan negara ini. Indonesia menempati peringkat ketiga dengan tutupan hutan tropis terbesar di dunia, setelah Brasil dan Kongo (KLHK, 2021). Hutan di Indonesia memiliki peran signifikan dalam menstabilkan iklim global dengan menyerap dan menyimpan karbon dioksida. Setiap wilayah di Indonesia memiliki karakteristik vegetasi hutan yang berbeda. Selain hutan alam, Indonesia juga memiliki hutan buatan, seperti Hutan Tanaman Industri (HTI), yang banyak dimanfaatkan untuk kepentingan industri kayu, seperti hutan sengon dan hutan mangium (Pasay, 2020).

HTI memiliki berbagai manfaat, termasuk menghasilkan tiga jenis utama produk kayu berdasarkan tujuan pemanfaatannya, yaitu: kayu pertukangan (misalnya kayu lapis, finis, dan kayu gergajian), kayu serat (digunakan untuk pembuatan kertas, rayon, dan papan serat), serta kayu energi (seperti arang dan kayu bakar). HTI tidak hanya berfungsi sebagai sumber bahan baku industri, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan, seperti mengurangi erosi tanah, menyerap emisi karbon, dan meningkatkan kualitas lingkungan (Yama *et al.*, 2014).

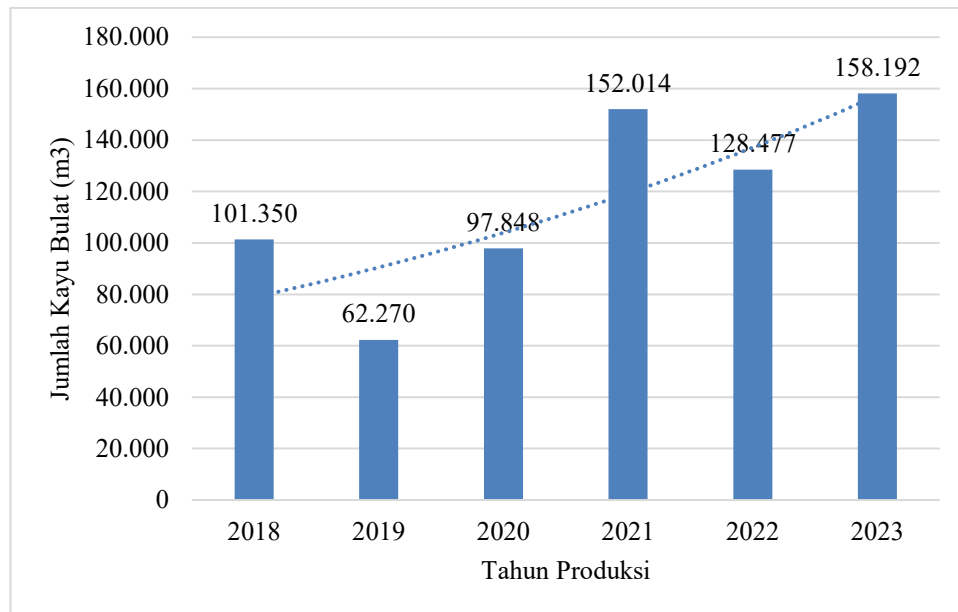
Meskipun demikian, perkembangan industri kayu yang pesat telah menyebabkan ketidakseimbangan antara kapasitas hutan sebagai penyedia bahan baku dengan kebutuhan industri. Dengan kapasitas terpasang 2.338.297 m³ dan suplai bahan baku 1.394.362,07 m³ di industri primer kayu (IPHHK) di Kalsel Tahun 2006 pada kayu lapis, kayu gergajian, dan finis diperlukan bahan baku

sebesar 4.676.594 m³, sehingga terjadi kekurangan sekitar 3 juta m³ per tahun (Subari, 2014). Salah satu solusi untuk mengatasi masalah ini adalah dengan mengembangkan HTI, seperti pengelolaan HTI pada tanaman sengon (*Falcataria moluccana*). Sengon menjadi pilihan utama karena memiliki pertumbuhan yang cepat, produktivitas kayu yang tinggi, serta kemampuan tumbuh di berbagai kondisi lingkungan. Hal ini menghasilkan produksi kayu yang seragam dengan kualitas yang baik (Irianto *et al.*, 2006).

2.2 Kayu Sengon

Sengon (*Falcataria moluccana*) menjadi pilihan utama dalam program hutan tanaman industri. Karena kecepatan pertumbuhannya dan kemampuan untuk bertahan hidup di berbagai jenis tanah, pohon ini sangat cocok untuk industri. Selain itu, pohon ini juga merupakan bahan baku yang baik untuk industri panel kayu dan kayu lapis (Sihombing, 2024). Di beberapa daerah di Indonesia, pohon sengon menjadi bagian penting dalam tanaman kehutanan, rehabilitasi lahan, dan sistem agroforestri. Kayu sengon juga berkontribusi pada perbaikan tanah, yang meningkatkan kesuburan tanah. Industri kayu di Indonesia bergantung pada sengon setelah pasokan kayu dari hutan alam mulai menurun (Riniarti *et al.*, 2025; Sari *et al.*, 2024; Wijaya *et al.*, 2021).

Kebutuhan kayu sengon setiap tahun rata-rata sekitar 100.000 m³ (Wijaya *et al.*, 2025). Hal tersebut terjadi karena kayu sengon digunakan sebagai bahan baku untuk meubel berkualitas menengah ke bawah, penyangga cor bangunan, pembuatan rumah, dan kertas (Yulianto, 2018). Tanaman ini pertama kali ditemukan oleh Teysman di Pulau Banda pada tahun 1871 dan dikenal sebagai pohon asli dari Kepulauan Indonesia Timur sebelum akhirnya menyebar ke seluruh Asia Tenggara pada tahun 1870-an. Pohon sengon memiliki karakteristik yang berbeda dengan jenis pohon hutan lainnya karena pertumbuhannya yang cepat (Wulandari dan Amin, 2023).



Sumber: *Statistik Perusahaan Pembudidaya Tanaman Kehutanan, 2011-2023*.

Gambar 2. Produksi Kayu Bulat Tahun 2018-2023 pada Tanaman Sengon

Berdasarkan data produksi kayu sengon dari tahun 2018 hingga 2023 (Gambar 2), terlihat bahwa ketersediaan kayu sengon terus menunjukkan angka yang signifikan, dengan fluktuasi produksi di kisaran 62.270 m³ hingga 158.192 m³. Produksi tertinggi tercatat pada tahun 2023 dengan jumlah 158.192 m³, sementara tahun 2021 masih menunjukkan angka yang cukup tinggi yaitu 152.014 m³. Angka-angka ini mencerminkan potensi ketersediaan kayu sengon yang melimpah dalam beberapa tahun terakhir. Dengan karakteristik kayu sengon yang cepat tumbuh, memiliki biaya produksi rendah, dan fleksibilitas tinggi dalam berbagai aplikasi, kayu ini menjadi pilihan strategis untuk bahan baku kayu gergajian. Data produksi yang stabil menunjukkan peluang besar untuk mendukung kebutuhan industri konstruksi dan pengolahan kayu. Pemanfaatan teknologi modern seperti pemotongan menggunakan laser CO₂ juga dapat meningkatkan efisiensi serta kualitas pengolahan kayu sengon, mendukung keberlanjutan industri kayu di Indonesia (Badan Pusat Statistik, 2023).

Kayu sengon merupakan salah satu komoditas ekonomi yang dianggap prospektif dan menjanjikan secara finansial dalam pengelolaan hutan rakyat. Namun, komoditas ini masih menghadapi kendala pada tingkat ketahanannya terhadap penyusutan (Ramadhan, 2015). Kayu sengon termasuk dalam kelas awet

IV-V dan kelas kuat IV-V dengan kadar air 15% serta berat jenis berkisar antara 0,24-0,49 g/cm³. Kayu ini memiliki serat lurus dan tekstur yang agak kasar, tetapi mudah diolah. Warna kayu terasnya bervariasi dari kuning mengkilap hingga coklat kemerahan. Dengan nilai ekonomi yang tinggi dan manfaat ekologis yang luas, kayu sengon sangat potensial untuk dijadikan salah satu komoditas utama dalam pembangunan hutan tanaman (Insanimuna *et al.*, 2024). Keunggulan utama pohon sengon terletak pada laju pertumbuhannya yang cepat, sehingga digolongkan sebagai jenis tanaman cepat tumbuh (*fast-growing species*) (Utama *et al.*, 2019).

Selain itu, pengelolaan pohon sengon relatif mudah dilakukan. Faktor lain yang menjadikan sengon memiliki prospek cerah adalah permintaan pasar terhadap kayunya yang terus mengalami peningkatan. Pada saat ini, kayu sengon telah menjadi salah satu jenis kayu yang berfungsi sebagai pemasok bahan baku untuk berbagai industri, seperti industri kayu pertukangan dan industri kayu pulp. Kayu sengon memiliki berbagai manfaat, di antaranya digunakan sebagai bahan untuk pembuatan mebel, kayu gergajian, kayu lapis, palet, serta bahan bangunan. Tanaman sengon termasuk dalam keluarga Leguminosae dan sering dimanfaatkan untuk program reboisasi di sektor kehutanan karena tergolong sebagai *fast-growing tree*. Tanaman ini dikenal dengan berbagai nama daerah sesuai lokasi tumbuhnya. Pemerintah juga menginisiasi program “Sengonisasi” sebagai upaya untuk memulihkan daerah-daerah kritis yang rentan terhadap bencana erosi (Yunita *et al.*, 2021). Pohon sengon dapat dilihat pada Gambar 3 yang menunjukkan pohon kayu sengon beserta penjelasan klasifikasi sengon:

Kingdom : Plantae
 Divisi : Spermatophyta
 Sub Divisi : Angiospermae
 Classis : Dicotyledonae
 Ordo : Fabales
 Famili : Fabaceae
 Genus : *Falcataria*
 Spesies : *Falcataria moluccana* (L.) Nielsen



Sumber: <https://siarindomedia.com/2025/02/11/kayu-sengon-potensi-ekonomi-dan-manfaat-lingkungan/>

Gambar 3. Kayu Sengon

Kayu memiliki dua sifat utama, yaitu sifat fisik dan sifat mekanik. Sifat fisik kayu mencakup berat jenis, kadar air, penyusutan, dan kerapatan, sementara sifat mekanik meliputi kekuatan tekan, lentur, keteguhan geser, keteguhan belah, dan kekuatan tarik. Kedua sifat ini sangat berperan dalam menentukan pemanfaatan kayu. Sebagai contoh, kerapatan kayu memengaruhi sifat higroskopis, kekuatan, penyusutan, sifat kelistrikan, akustik, serta aspek lain yang berkaitan dengan proses pengolahan kayu (Pasai, 2020). Kayu sengon tergolong ringan hingga sedang, dengan densitas 0,32-0,64 g/cm³ pada kadar air 15%. Kayu ini memiliki serat lurus, tekstur agak kasar, mudah diolah, dan teras kayunya berwarna kuning mengkilap hingga cokelat kemerahan. Selain itu, kayu sengon tidak mudah diserang rayap tanah karena mengandung zat ekstraktif yang melindunginya (Perhutani, 2024).

Salah satu keunggulan kayu adalah sifatnya yang dapat diperbarui. Sebagai bahan baku yang terbarukan, kayu tidak akan habis jika penggunaannya berpedoman pada prinsip kelestarian dan pemanfaatan yang bijak. Namun, kelangkaan jenis kayu tertentu dapat terjadi, bahkan berpotensi punah, meskipun jenis lain yang memiliki kualitas bersaing dapat menggantikannya. Saat ini, ketersediaan kayu terutama dari hutan alam produksi semakin menurun, sehingga kayu dari hutan tanaman dan hutan rakyat, seperti kayu sengon menjadi alternatif utama.

Kayu sengon dipilih sebagai jenis utama dalam hutan tanaman industri di Indonesia karena pertumbuhan yang cepat, adaptasi baik pada berbagai jenis tanah, karakteristik silvikultur yang unggul, serta kualitas kayu yang cocok untuk industri panel, kayu pertukangan dan pembuatan *biochar* yang berpotensi untuk melestarikan unsur P di tanah hutan (Wijaya *et al.*, 2022; Tarigan *et al.*, 2021; Yunita *et al.*, 2023). Pemahaman terhadap sifat-sifat kayu sangat penting dalam industri pengolahan kayu untuk memilih jenis kayu yang sesuai, menentukan penggunaannya, serta menemukan alternatif jika jenis tertentu sulit diperoleh secara kontinu atau terlalu mahal. Kayu sengon memiliki variasi berat jenis di setiap bagian batang, dengan berat jenis tertinggi pada bagian tengah dan terendah pada pangkal serta ujung batang. Persentase kadar air tertinggi terdapat pada ujung batang, sedangkan yang terendah pada bagian tengah batang. Penyusutan kayu sengon pada arah tangensial lebih besar dibandingkan arah radial. Berdasarkan klasifikasi PKKI NI 5-1961, kayu sengon tergolong dalam Kelas Awet IV-V dan Kelas Kuat IV-V (Lessy *et al.*, 2018).

2.3 Struktur Kayu Sengon

Kayu sengon memiliki struktur yang khas berupa berpori, ringan, dan berserat, dengan densitas rendah dan volume serat yang cukup tinggi. Penelitian yang dilakukan Rahmawati *et al.* (2019) menunjukkan bahwa kayu sengon memiliki sistem pembuluh yang menyebar merata, panjang serat sedang, dan didominasi oleh elemen serat dengan sedikit parenkim. Berat jenis kayu cenderung meningkat dengan pertambahan umur pohon, dari 0,26 pada umur 4 tahun hingga 0,38 pada umur 10 tahun. Serat-serat kayu sengon berperan penting dalam menyusun jaringan dasar kayu, yang sebagian besar terdiri atas sel-sel panjang dan tipis yang tersusun dari selulosa dan diikat oleh lignin. Struktur ini menyebabkan kayu sengon cenderung memiliki kekuatan mekanik yang rendah, mudah retak sejajar arah serat, serta kurang tahan terhadap beban dan panas tinggi (Latif dan Rahmawati, 2025).

Struktur kayu sengon secara makroskopis terdiri dari tiga bagian utama yaitu:

1. Kayu gubal adalah bagian luar yang masih hidup dan aktif mengangkut air serta nutrisi.

2. Kayu teras merupakan bagian dalam yang sudah mati dan seringkali lebih padat karena mengandung zat ekstraktif.
3. Hati kayu berada di pusat batang dan biasanya bersifat lebih rapuh karena merupakan kayu pertama hasil aktivitas kambium.

Secara mikroskopis, sel-sel penyusun kayu sengon memiliki lumen yang besar dan dinding sel yang relatif tipis, menyebabkan porositas tinggi dan kerapatan rendah. Ciri ini menjadikan kayu sengon mudah diolah, namun kurang tahan terhadap degradasi termal. Dalam perlakuan panas seperti pengukiran menggunakan laser CO₂, kayu sengon cenderung mengalami karbonisasi permukaan yang cepat, perubahan warna signifikan, serta peningkatan kekasaran akibat struktur sel yang mudah rusak ketika terkena panas intens. Hal ini juga berdampak pada rendahnya luas permukaan spesifik yang terbentuk jika kayu ini digunakan untuk pembuatan karbon aktif (Erawati dan Fernando, 2018).

Karena itu, pemahaman terhadap struktur anatomi dan sifat fisik kayu sengon seperti berat jenis, kerapatan, dan pola lingkaran tahun sangat penting dalam menentukan perlakuan yang tepat terhadap kayu ini, terutama saat digunakan dalam proses pelaseran atau aplikasi berbasis termal lainnya.

2.4 Garitan (*Kerf*)

Lebar garitan (*kerf width*) dapat digunakan sebagai parameter untuk menentukan kualitas hasil potong. *Kerf width* adalah celah atau jalur potongan yang terbentuk akibat pemotongan dalam proses kayu gergajian. Pemotongan kayu biasanya dilakukan menggunakan *circular saw* ataupun gergaji pita (*bandsaw*). *Kerf* yang dihasilkan dari *circular saw* lebih besar daripada menggunakan *bandsaw*, hal tersebut dikarenakan mata gergaji yang berbeda ukuran dan cara pemotongan. Adapun kelebihan dari *bandsaw* yaitu dapat digunakan untuk memotong kayu dengan diameter yang lebih besar.

Kerf width adalah celah atau jalur potongan yang terbentuk akibat radiasi sinar laser pada proses laser *cutting*. Proses ini menghasilkan suhu eksoterm yang menyebabkan penyubliman pada area potong, sehingga terbentuk jalur pemotongan pada material. Area *kerf width* memiliki peran yang sangat penting dalam

menentukan keberhasilan potongan. Keberhasilan tersebut dapat diukur dari struktur geometris hasil potongan. Semakin kecil ukuran *kerf width* yang dihasilkan, semakin baik kualitas potongan. Tingkat keberhasilan proses pemotongan dapat dilihat dari objek yang terpotong, terutama pada lebar jalur potongan yang menunjukkan area radiasi sinar laser (Assyifa *et al.*, 2023).

2.5 Laser

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) adalah sebuah alat yang bekerja dengan memancarkan radiasi elektromagnetik dalam bentuk cahaya. Cahaya ini dihasilkan melalui proses pancaran terstimulasi dan tidak dapat dilihat secara langsung oleh mata normal. Laser memancarkan foton secara koheren dalam satu pancaran tunggal. Prinsip kerja laser memanfaatkan energi panas dari sinar laser untuk mencairkan atau menguapkan material sehingga memungkinkan proses pemotongan (Luthfi *et al.*, 2021).

Penggunaan laser memiliki berbagai keunggulan dalam proses produksi. Teknologi ini memungkinkan pengerjaan yang cepat karena mesin laser dapat langsung menerima data atau instruksi dari komputer (Samarya *et al.*, 2020). Selain itu, laser mampu memotong benda-benda dengan bentuk yang rumit, menghasilkan berbagai desain grafis sesuai keinginan, serta memberikan hasil pemotongan yang optimal pada material (Arifin, 2018). Laser juga memiliki kelebihan lain karena dapat diaplikasikan pada berbagai jenis material, seperti kayu, pelat, akrilik, kaca, dan kertas karton (Nugroho *et al.*, 2018). Melalui proses emisi spontan, laser mampu memancarkan gelombang elektromagnetik yang bersifat koheren dimana cahaya yang dipancarkan frekuensinya sempit dan tidak menyebar (Badruzzaman *et al.*, 2017). Mesin laser memiliki berbagai kemampuan diantaranya:

- Memotong (*Cutting*)

Proses pemotongan menggunakan laser dilakukan dengan mengatur sinar laser agar dapat menembus material hingga potongan yang diinginkan terlepas. Potongan ini dapat menggunakan sisi negatif maupun positif dari material. Pemotongan dilakukan dengan kecepatan sedang dan daya laser yang tinggi. Laser dapat digunakan untuk memotong berbagai jenis material, seperti akrilik, MDF,

tripleks/multipleks, kayu *veneer cork*, karet, kulit, karton/kertas, dan beberapa jenis kain.

- Menggores

Pada proses menggores, sinar laser hanya merusak permukaan material, sehingga meninggalkan tanda berupa goresan. Proses ini dilakukan dengan kecepatan tinggi dan daya laser yang rendah.

- Mengukir

Mengukir dilakukan dengan mengatur sinar laser agar menggores permukaan material hingga menghasilkan kedalaman yang bervariasi. Hal ini memungkinkan pembuatan gambar atau tulisan yang dapat dikenali dengan jelas. Proses gravir dilakukan dengan kecepatan rendah dan daya laser yang sedang.

- Melubangi

Proses melubangi menggunakan sinar laser untuk membuat lubang-lubang kecil pada material dalam bentuk bulatan-bulatan. Perforasi dilakukan dengan kecepatan tinggi dan daya laser yang sedang (Suharto dan Saputra, 2021).

2.6 Jenis-Jenis Laser

Laser memiliki berbagai jenis bentuk dan setiap jenis laser memiliki kegunaan yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik. Laser memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari jenis sinar lainnya. Keistimewaan inilah yang menjadikan laser begitu spesial. Berdasarkan pancaran berkasnya, laser terbagi menjadi dua jenis, yaitu laser kontinu dan laser pulsa. Setiap jenis laser memiliki karakteristik yang berbeda, seperti panjang gelombang, energi, dan profil berkas. Perbedaan ini memberikan kelebihan dan kekurangan masing-masing dalam berbagai aplikasi (Manurung *et al.*, 2013). Adapun berbagai macam jenis laser adalah sebagai berikut.

2.6.1 Laser Fiber

Laser fiber menggunakan serat optik untuk membangkitkan dan mengarahkan berkas laser. Laser ini umumnya menggunakan bahan aktif berupa serat terdoping dengan *Ytterbium* atau *Erbium*. Laser fiber cocok digunakan untuk

mengukir logam, keramik, dan bahan non-logam. Laser fiber memiliki kualitas berkas yang baik dan efisiensi energi yang tinggi (Meijer *et al.*, 2017).

2.6.2 Laser Nd:YAG (*Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet*)

Laser Nd:YAG merupakan laser padat yang menggunakan kristal YAG (*Yttrium Aluminum Garnet*) yang didoping dengan Neodymium sebagai bahan aktif. *Neodymium-doped yttrium aluminium garnet*; Nd:Y₃Al₅O₁₂ (Nd:YAG) adalah kristal yang berfungsi sebagai media penguat pada laser *solid-state*, yaitu laser yang menggunakan media padat. Teknologi ion *neodymium* dalam berbagai jenis kristal ionik mampu memancarkan cahaya dengan panjang gelombang 1064 nm, yang dihasilkan dari transisi atom tertentu pada ion neodymium. Nd:YAG merupakan salah satu jenis laser *solid-state* yang banyak diminati dan digunakan secara luas di berbagai bidang, karena memiliki sejumlah keunggulan (Stevanie, 2020). Laser Nd:YAG dapat digunakan untuk mengukir logam, keramik, dan bahan non-logam dengan kualitas yang baik. Laser ini memiliki daya yang tinggi dan dapat dioperasikan secara *pulsed* atau *continuous* (Marimuthu *et al.*, 2019).

2.6.3 Laser DPSS (*Diode-Pumped Solid State*)

Laser DPSS (*Diode-Pumped Solid State*) adalah jenis laser dengan struktur dasar yang terdiri dari elemen penguat yang ditempatkan di dalam sebuah resonator optik. Laser ini merupakan jenis laser yang menggunakan bahan semikonduktor sebagai medium aktif. Elemen penguat pada laser DPSS perlu distimulasi terlebih dahulu untuk menghasilkan pancaran laser. Proses stimulasi ini dapat dilakukan melalui pelepasan energi listrik dari plasma, seperti yang digunakan pada laser ion argon, atau melalui radiasi optik, seperti pada proses yang melibatkan cahaya lampu (Manurung, 2013). Laser ini relatif lebih murah dan kompak dibandingkan jenis laser lainnya. Laser diode seringkali digunakan untuk pengukiran pada bahan seperti plastik, kertas, dan bahan organik lainnya dengan kedalaman yang tidak terlalu dalam (Ghorbani *et al.*, 2016).

2.6.4 Laser He-Ne (*Helium Neon*)

Laser He-Ne (*Helium Neon*) merupakan jenis laser gas yang paling ekonomis dan mudah ditemukan di pasaran. Laser ini biasanya beroperasi pada panjang gelombang 632,8 μm dengan cahaya berwarna merah. Selain itu, terdapat variasi laser He-Ne dengan panjang gelombang lainnya, seperti 611,9 μm (jingga), 594,1 μm (kuning), 543,5 μm (hijau), dan sebagainya. Laser He-Ne banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk spektroskopi, holografi, perawatan medis, metrologi, dan pemindaian barcode. Laser ini menggunakan medium berupa campuran gas helium dan neon dengan perbandingan 10:1 (Manurung, 2013).

2.6.5 Laser CO₂ (Karbon Dioksida)

Laser CO₂ adalah jenis laser yang mampu menghasilkan energi tinggi dan dikenal sebagai salah satu laser paling efisien. Laser ini bekerja dengan memanfaatkan gas karbon dioksida (CO₂) sebagai medium aktifnya bekerja dengan memancarkan gelombang inframerah yang dapat melelehkan atau membakar permukaan bahan secara terkendali. Transisi penting terjadi di antara tingkat energi vibrasi molekul CO₂ pada laser ini. Laser CO₂ dapat beroperasi dalam mode kontinu, pulsa, atau *Q-switching*. Meskipun menggunakan daya yang relatif kecil, laser CO₂ mampu memancarkan sinar laser dengan kekuatan rendah yang cukup untuk memotong berbagai material dengan cepat. Saat ini, laser CO₂ banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri, seperti pemotongan logam, bahan tekstil, dan pengelasan logam (Manurung *et al.*, 2013). Laser ini juga salah satu jenis laser yang paling umum digunakan untuk pengukiran pada bahan seperti kayu, akrilik, kulit, dan bahan organik lainnya. Laser ini efektif untuk pengukiran dengan kedalaman yang lebih dalam dan detail yang halus (Dusseault, 2009).

Laser CO₂ memiliki keunggulan seperti kombinasi ketepatan yang tinggi dan daya keluaran yang besar, biasanya berkisar antara 5-20% dari total daya yang digunakan untuk menghasilkan sinar. Angka ini merupakan yang tertinggi dibandingkan dengan jenis laser gas lainnya. Laser CO₂ memancarkan panjang gelombang antara 9-11 μm , meskipun panjang gelombang yang paling umum diterima adalah 10,6 μm . Dengan panjang gelombang tersebut, laser CO₂ efektif digunakan untuk pemrosesan material organik dan keramik (Ismail, 2012). Laser

CO₂ bekerja dengan daya laser tinggi pada material yang akan dipotong sehingga material akan terbakar, meleleh, menguap karena gas, dan menciptakan tepi dengan permukaan yang memiliki kualitas tinggi karena pengaruh gas nitrogen (Samarya *et al.*, 2013).

2.7 Bagian-Bagian Laser CO₂

Menurut penelitian Ogana (2018), laser terdiri dari komponen yang dapat membentuk sinar, yaitu:

1. Medium laser terdiri dari ion, molekul, atau atom yang terstimulasi untuk menghasilkan energi dan memancarkan sinar laser. Pada laser CO₂, medium ini berupa campuran gas Nitrogen (N₂), Karbon Dioksida (CO₂), dan Helium (He). Gas N₂ diperlukan untuk menghasilkan energi yang merangsang atom CO₂, sementara gas CO₂ berfungsi sebagai medium laser aktif. Gas He digunakan untuk mengatur suhu dengan cara menyerap panas, dan sistem pompa memanfaatkan energi sinar laser. Frekuensi tinggi sekitar 13,56 MHz digunakan untuk meningkatkan energi atom.
2. Sinar laser dibentuk pada resonator. Resonator laser terletak di antara dua cermin: cermin belakang (cermin dalam) dan cermin luar (cermin keluar). Kedua cermin dapat mengarahkan sinar gelombang ke arah yang tepat. Cermin belakang memantulkan sinar laser, dan sebagian besar dari 40 - 50% sinar laser yang dibentuk akan dipancarkan keluar dari resonator.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan pada bulan Februari sampai bulan Juni di tahun 2025. Kegiatan utama penelitian ini yaitu pelaseran kayu menggunakan mesin laser CO₂, pengukuran kadar air, dan kerapatan kayu yang dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Pengujian mikroskopis untuk mengukur kedalaman dan lebar pemotongan dilakukan di Laboratorium Ilmu Hama dan Tumbuhan, Jurusan Proteksi Tanaman Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Pengujian kekasaran permukaan kayu dilakukan di Laboratorium Metrologi Industri, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Pengujian sudut kontak dengan alat mikropipet dilakukan di Laboratorium Zoologi, Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Lokasi tersebut diputuskan dengan pertimbangan analisis data yang diperlukan pada penelitian ini.

3.2 Alat dan Bahan

Penelitian ini memanfaatkan mesin laser CO₂ dengan daya 50 Watt sebagai alat utama, didukung oleh mikroskop stereo untuk analisis visual, sudut kontak untuk mengetahui keterbasahan kayu sengon setelah perlakuan, perangkat lunak statistik untuk pengolahan data dan kamera untuk dokumentasi. Bahan penelitian terdiri dari papan kayu sengon yang telah disiapkan dengan ketebalan 2 cm.

3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilakukan dengan memberikan perlakuan pada objek penelitian yaitu kayu sengon dalam kondisi yang terkendalikan. Perlakuan yang diberikan pada kayu sengon dilakukan dengan parameter laser CO₂ sesuai dengan susunan percobaan. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan pengujian kualitas dan perubahan morfologi papan kayu sengon. Pada penelitian ini terdapat beberapa parameter yaitu:

1. Daya Laser (*Laser Power*) : 5 W, 10 W, 15 W, 30 W, 40 W, dan 50 W,
2. Kecepatan (*Cutting Speed*) : 2 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s, dan 8 mm/s.

3.3.1 Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah salah satu pendekatan dalam *off-line Quality Control* (QC) dengan tujuan untuk mengoptimalkan desain proses dan produk sebelum atau setelah proses produksi berlangsung. Pendekatan ini diperkenalkan oleh Genichi Taguchi (1949), yang menggunakan *Orthogonal Array* (OA) sebagai alat untuk merancang tata letak eksperimen. Dengan memanfaatkan OA, metode ini memungkinkan pengurangan jumlah kombinasi percobaan yang harus dijalankan, sehingga lebih efisien dalam hal waktu, biaya, dan penggunaan bahan. Selain itu, metode Taguchi membantu mengidentifikasi faktor-faktor yang paling memengaruhi kualitas serta menentukan parameter optimal untuk mencapai hasil terbaik. Pendekatan ini sangat relevan dalam proses produksi, karena mampu mengurangi variasi dan memastikan kualitas yang konsisten dengan cara yang hemat sumber daya (Sekartaji *et al.*, 2021).

3.3.2 Matriks Orthogonal Array

Matriks OA dibuat berdasarkan parameter pada rancangan penelitian, sehingga pada penerapan metode Taguchi digunakan matriks orthogonal L9 (3²) sehingga jumlah eksperimen yang akan dilakukan adalah sembilan eksperimen dengan pengulangan tiga kali dalam bentuk matriks. Rancangan eksperimen Pematangan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rancangan Eksperimen Pemotongan

Eksperimen ke-	Daya Laser (Watt)	Kecepatan Pemotongan (mm/s)
1	30	2
2	30	4
3	30	6
4	40	2
5	40	4
6	40	6
7	50	2
8	50	4
9	50	6

Rancangan eksperimen pengukuran dilakukan dengan variabel yang berbeda dengan daya yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi (Tabel 2) untuk menghasilkan perubahan warna yang mendekati warna kontrol. Keuntungan menggunakan matriks L9 (3^2) adalah untuk efisiensi eksperimen sehingga penggunaan kombinasi diatas memungkinkan analisis pengaruh masing masing faktor terhadap respon yang diinginkan.

Tabel 2. Rancangan Eksperimen Pengukuran

Eksperimen	Daya Laser (Watt)	Kecepatan Pemotongan (mm/s)
1	5	4
2	5	6
3	5	8
4	10	4
5	10	6
6	10	8
7	15	4
8	15	6
9	15	8

3.3.3 Analisis S/N Ratio (*Signal-to-Noise Ratio*)

Metode Taguchi menggunakan rasio *Signal-to-Noise* (S/N) untuk mengevaluasi hasil eksperimen. Rasio S/N dihitung berdasarkan jenis respon yang diinginkan, yaitu :

Smaller is better: Digunakan untuk respon yang diinginkan seminimal mungkin (Kekasaran permukaan). Analisis data menggunakan metode *Signal-to-Noise* (S/N) *Ratio* untuk menentukan kombinasi parameter terbaik.

Smaller is better :

$$-10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

Keterangan :

y_i^2 = Kuadrat dari nilai pengamatan ke-i.

n = Jumlah sampel

Larger is better :

$$-10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

Keterangan :

y_i = Nilai hasil pengamatan ke-i.

n = Jumlah sampel

3.4 Parameter Penelitian

Metode eksperimen dengan skala laboratorium digunakan dalam penelitian ini untuk mengetahui kualitas dan perubahan topografi dan morfologi permukaan kayu sengon, dan kedalaman potong pada kayu sengon. Pengukuran lebar garitan dan kedalaman potong dilakukan menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 12x. Untuk memastikan akurasi hasil, setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali, dan rata-rata dari pengukuran tersebut digunakan sebagai nilai akhir.

Perlakuan eksperimen melibatkan pengaturan daya laser (5W, 10W, 15W, 30W, 40W, 50W), kecepatan pemotongan (2 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s dan 8 mm/s), dan arah tangensial. Pemotongan laser dilakukan dengan dua orientasi arah serat yaitu longitudinal dan tangensial.

3.5 Mekanisme Pelaseran Papan Kayu

Pada mekanisme pelaseran kayu, terdapat dua jenis arah pemotongan yang digunakan, yaitu arah longitudinal dan tangensial. Potongan longitudinal dilakukan dengan cara memotong tegak lurus terhadap pertumbuhan pohon. Pemotongan ini menghasilkan pola serat yang lurus dan sejajar, memberikan stabilitas yang lebih baik terhadap penyusutan dan pengembangan, serta menghasilkan kayu dengan kualitas dan ketahanan yang lebih baik terhadap perubahan cuaca.

Sebaliknya, potongan tangensial dilakukan sejajar dengan garis singgung lingkaran tahun, memotong lingkaran sepanjang tahun sehingga membentuk sudut. Pola serat yang dihasilkan lebih bervariasi dan dekoratif, meskipun kayu jenis ini lebih rentan terhadap penyusutan dan pengembangan. Potongan tangensial sering digunakan untuk mendapatkan pola serat kayu yang menarik dengan biaya produksi yang lebih ekonomis.

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Persiapan Alat dan Pengaturan Mesin Laser CO₂

Mesin laser CO₂ CNC LS6040 50W yang dapat dilihat pada Gambar 4 merupakan perangkat yang digunakan untuk proses pemotongan dengan beberapa komponen utama, yaitu pipa asap, kipas asap, pompa air, kabel daya, kabel *ground*, kabel *port paralel*, dan kabel USB. Pipa dan kipas asap berfungsi untuk mengatur sirkulasi udara keluar dan masuk ke dalam mesin. Pompa air digunakan sebagai sistem pendingin mesin laser dengan cara mengalirkan air masuk dan keluar dari mesin. Kabel daya menghubungkan mesin dengan sumber tegangan, sedangkan kabel *ground* berfungsi untuk sistem pentanahan (*grounding*) yang dihubungkan langsung ke kabel *port paralel* dan berperan sebagai pengendali mesin laser melalui perangkat lunak dengan menghubungkan komputer ke mesin laser.



Gambar 4. Laser CO₂ CNC LS6040 50 W

Dalam penelitian ini, perangkat lunak *Corel Draw Laser DRW* versi X7 digunakan untuk mendukung proses desain pemotongan. Software ini umum

digunakan pada mesin laser untuk merancang pola pemotongan sekaligus mengatur parameter seperti kecepatan pemotongan. Corel Draw Laser mendukung berbagai ekstensi file, sehingga fleksibel untuk kebutuhan desain. Dalam penggunaannya, pemilihan *Device ID* pada menu *Cutting Machine Properties* perlu diperhatikan agar perangkat lunak dapat terhubung dengan mesin laser. Setelah proses instalasi perangkat keras dan perangkat lunak selesai, penting untuk memastikan komputer telah terhubung dengan mesin laser agar perangkat dapat dioperasikan dengan baik.

3.6.2 Persiapan Bahan

Sampel kayu sengon yang digunakan adalah papan kayu sengon yang berasal dari kayu gelondongan berumur 6 tahun dengan ketebalan 2 cm dan arah serat kayu tangensial. Sampel yang akan digunakan dipilih bermutu baik, terhindar dari cacat dan retakan yang mempengaruhi mutu kayu tanpa perlakuan pengeringan dan dipastikan tidak ada perbedaan geometri serat yang dapat menimbulkan bias (Maulana *et al.*, 2023; Ma'ruf *et al.*, 2023). Pengukuran kadar air diukur dengan menggunakan rumus:

$$KA = \frac{(BA-BK)}{BK} \times 100\%$$

Keterangan:

KA = Kadar air (%)

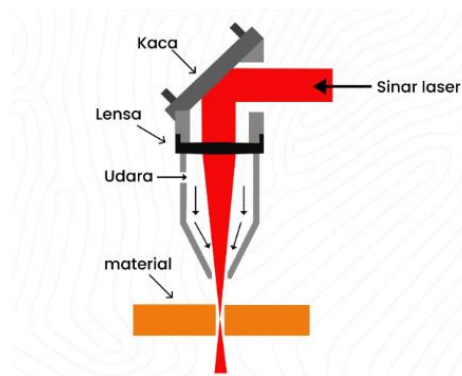
BA = Berat awal sampel kayu (g)

BK = Berat kering oven (g)

3.6.3 Pelaseran Papan Kayu Sengon (*Falcataria moluccana*)

Papan kayu sengon yang telah disiapkan diampas terlebih dahulu untuk memastikan permukaannya memiliki tingkat kekasaran yang seragam. Dalam eksperimen pemotongan, digunakan mesin pemotong laser CO₂ berdaya 50 W dengan panjang gelombang 10,63 μm, serta lensa fokus dengan panjang fokus 63,5 mm. Diameter titik laser selama proses pemotongan adalah 0,1 mm. Untuk membersihkan debu karbon dan asap yang dihasilkan selama pemotongan, udara terkompresi dialirkan melalui nosel jet gas koaksial dengan tekanan 0,4 bar. Sampel

kayu sengon ditempatkan pada bangku stasioner, sementara pergerakan kepala pemotong pada sumbu x dan y dikontrol menggunakan komputer. Sebelum pemotongan dimulai, titik laser difokuskan ke permukaan sampel dengan menyesuaikan alat pengangkat untuk memastikan jarak kebuntuan nosel diatur secara presisi. Jarak kebuntuan nosel ditetapkan sebesar 10 mm. Cara kerja mesin pemotongan laser CO₂ dapat dilihat pada Gambar 5.



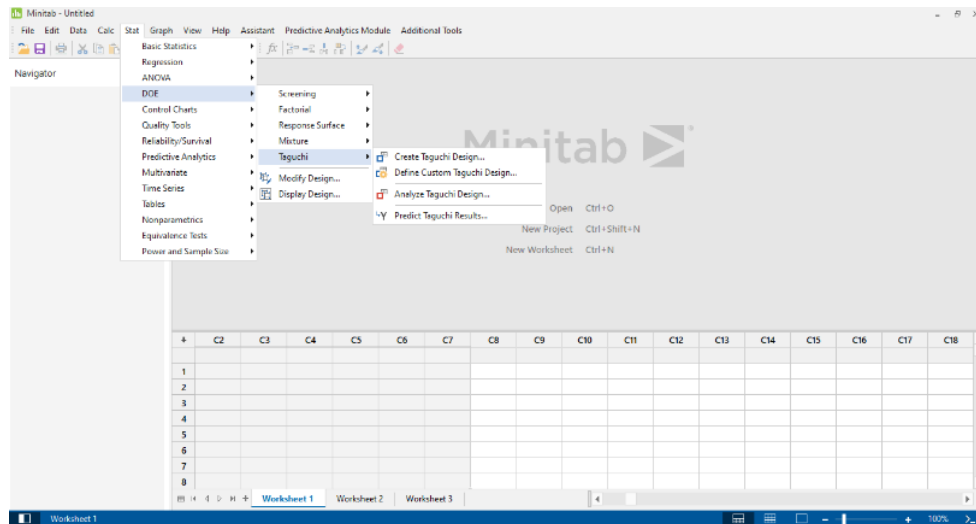
Sumber : [https://laysander.com/dunia-printing/penjelasan-tentang-mesin-laser-cutting- CO₂/](https://laysander.com/dunia-printing/penjelasan-tentang-mesin-laser-cutting-CO2/)

Gambar 5. Cara Kerja Pemotongan Laser CO₂

3.7 Perancangan Desain Percobaan

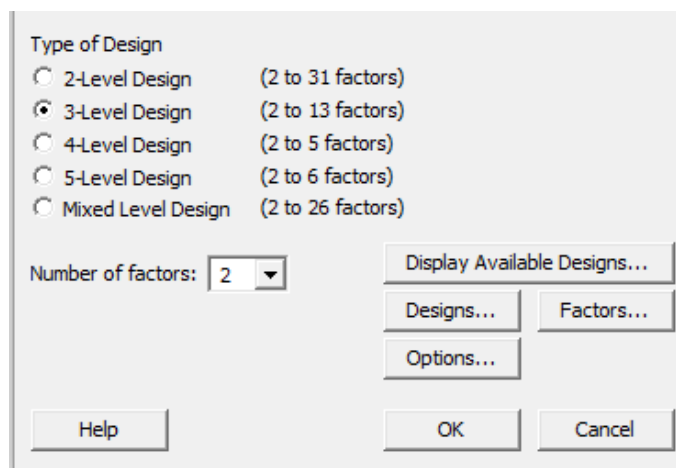
Langkah awal proses pelaseran adalah menentukan parameter yang akan digunakan dalam percobaan. Parameter yang digunakan meliputi intensitas daya laser, kecepatan pemotongan atau pengukiran, serta arah pemotongan. Untuk percobaan pengukiran, daya laser yang digunakan adalah 5 watt, 10 watt, dan 15 watt dengan kecepatan 4 mm/s, 6 mm/s, dan 8 mm/s. Sementara itu, untuk pemotongan, digunakan daya 30 watt, 40 watt, dan 50 watt dengan kecepatan 2 mm/s, 4 mm/s, dan 6 mm/s. Faktor ketiga yang digunakan pada pemotongan adalah arah pemotongan, yaitu longitudinal dan tangensial.

Pembuatan desain percobaan dilakukan menggunakan software *Minitab 22* dengan metode Taguchi Orthogonal Array (OA). Pada tampilan software, pilih stat seperti yang ditunjukkan Gambar 6, lalu klik *create Taguchi design*.



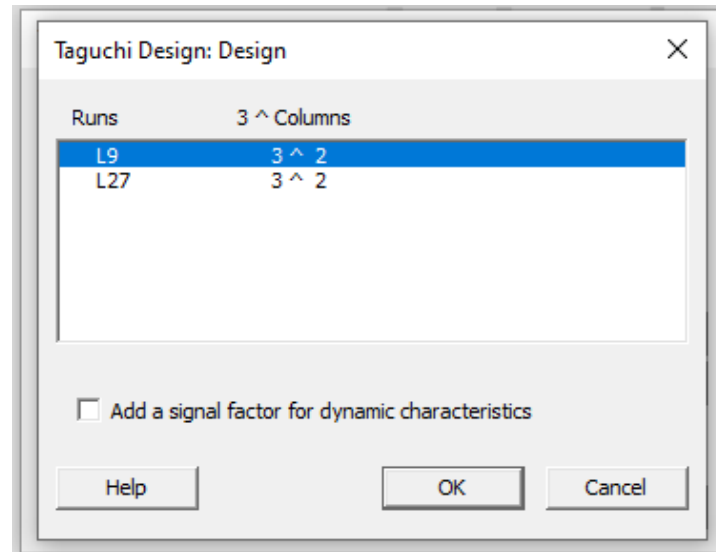
Gambar 6. Desain Percobaan Metode Taguchi menggunakan Minitab 22

Lalu akan muncul Taguchi design dan pilih *type of design 3-level* dengan *number of factors* yaitu 2 seperti Gambar 7.

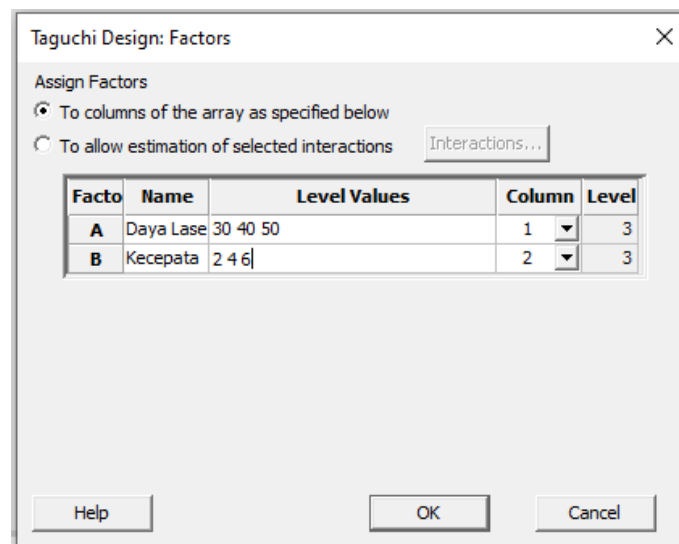


Gambar 7. Pengisian Tipe Desain dan Jumlah Faktor

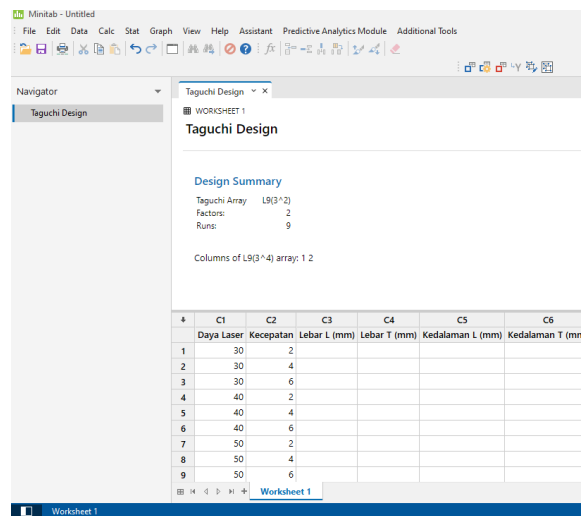
Selanjutnya pilih desain $L_9 3^2$ (Gambar 8) lalu klik OK.

Gambar 8. Desain OA L9 3²

Setelah parameter ditentukan, langkah selanjutnya adalah mengisi faktor dan menetapkan level dalam desain percobaan menggunakan perangkat lunak Minitab. Pada bagian *Name*, dimasukkan faktor-faktor seperti daya laser, kecepatan, dan arah pemotongan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 9. Sementara itu, kolom *Level Values* diisi dengan nilai-nilai level sesuai kategori pengukuran dan pemotongan.

Gambar 9. Desain Percobaan pada *Software* Minitab 22

Setelah seluruh data dimasukkan, perangkat lunak menghasilkan tabel rancangan percobaan berdasarkan kombinasi faktor yang telah ditetapkan. Untuk percobaan pengukuran, kombinasi daya laser yang digunakan adalah 5 watt, 10 watt, dan 15 watt, dengan kecepatan 4 mm/s, 6 mm/s, dan 8 mm/s. Sementara untuk pemotongan, digunakan daya 30 watt, 40 watt, dan 50 watt dengan kecepatan 2 mm/s, 4 mm/s, dan 6 mm/s. Kombinasi ini dirancang untuk mengoptimalkan hasil pelaseran sesuai dengan prinsip metode Taguchi. Kombinasi untuk pengisian data awal tabel dapat dilihat pada Gambar 10.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Daya Laser	Kecepatan	Lebar L (mm)	Lebar T (mm)	Kedalaman L (mm)	Kedalaman T (mm)
1	30	2				
2	30	4				
3	30	6				
4	40	2				
5	40	4				
6	40	6				
7	50	2				
8	50	4				
9	50	6				

Gambar 10. Tabel Data Awal

Setelah proses pelaseran selesai dilakukan dengan menggunakan kombinasi intensitas daya dan kecepatan yang telah ditentukan sebelumnya, data respon diinput ke dalam tabel.

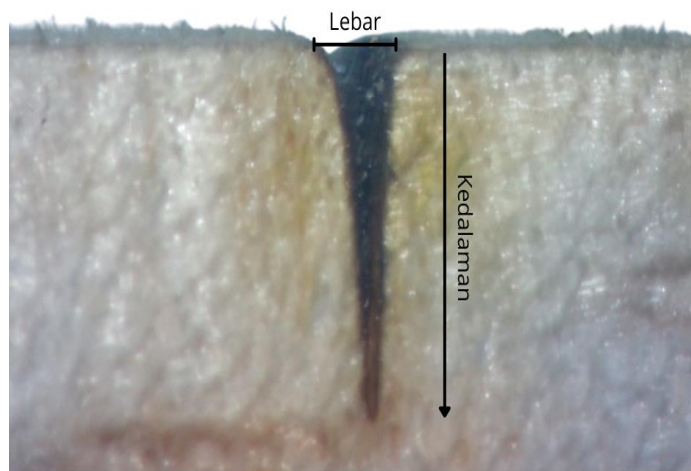
3.8 Pengujian Hasil Laser

3.8.1 Pengukuran *Kerf*

Pengukuran lebar garitan dan morfologi hasil pemotongan dilakukan menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 12x. Untuk mengurangi kesalahan eksperimental, nilai rata-rata dari tiga kali pengukuran dicatat sebagai hasil akhir lebar garitan pada setiap perlakuan. Metode ini digunakan untuk

menentukan dimensi lebar dan kedalaman garitan kayu sengon setelah pemotongan dengan laser CO₂ (Pujaningsih, 2018).

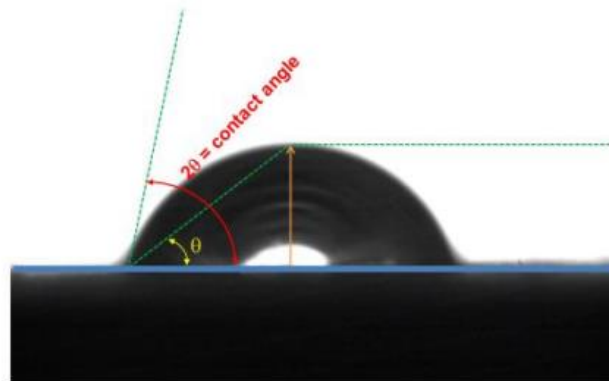
Kerf pada dasarnya merupakan pengukuran lebar dari suatu pemotongan, kerf yang dihasilkan pada berbagai mesin memiliki hasil yang berbeda sesuai dengan jenis kayu dan energi yang digunakan pada sebuah mesin. Kerf dipengaruhi kerapatan dari kayu sehingga perlu dilakukan pengukuran yang dapat dijadikan suatu pedoman untuk pemotongan maupun pengukiran yang stabil dan sesuai kebutuhan (Samboro *et al.*, 2017). Pengukuran Lebar dan Kedalaman Garitan dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Pengukuran Lebar dan Kedalaman Garitan pada Kayu Sengon setelah Perlakuan Laser CO₂

3.8.2 Uji Keterbasahan

Pengukuran sudut kontak dilakukan untuk mengetahui perbedaan daya serap kayu sebelum dan setelah pelaseran. Dalam uji keterbasahan terdapat dua karakteristik permukaan yang menunjukkan respons berbeda terhadap air, yaitu hidrofilik dan hidrofobik. Permukaan hidrofilik memiliki kecenderungan tinggi untuk berinteraksi dengan molekul air, sedangkan permukaan hidrofobik cenderung menolaknya (Putri dan Munasir, 2023). Sudut kontak diukur menggunakan metode setengah sudut kontak. Pengukuran dilakukan dengan cara menarik garis dari titik *triphasic* ke puncak tetesan pada permukaan kayu (Hidayat *et al.*, 2017). Nilai sudut kontak yang dihasilkan adalah 20 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 12.



Sumber: Hidayat *et al.* (2017)

Gambar 12. Pengukuran Sudut Kontak (θ).

Pengukuran ini menghasilkan data yang selanjutnya dapat diketahui sifat permukaan kayu yang hidrofobik atau hidrofilik. Sampel kayu yang digunakan adalah yang dihasilkan dari pengukiran dan kemudian diuji dengan meneteskan air destilasi pada permukaan kayu. Pengukuran sudut kontak dilakukan menggunakan kamera untuk mendapatkan informasi mengenai interaksi antara permukaan kayu dan air. Data yang dihasilkan berupa video berformat MP4, yang kemudian dianalisis sudut kontak menggunakan fasilitas pengukuran sudut dari perangkat lunak *ImageJ*.

Hasil uji keterbasahan memberikan informasi tentang perubahan sifat permukaan kayu, seperti daya serap air, porositas, dan energi permukaan, yang dipengaruhi oleh perlakuan pelaseran menggunakan laser CO₂. Informasi ini sangat bermanfaat dalam aplikasi yang lebih besar, terutama dalam industri pemotongan kayu menggunakan laser, dimana proses pelaseran dapat memengaruhi kemampuan kayu untuk menyerap cairan, baik itu air, perekat, atau bahan pelapis lainnya. Pada industri pengolahan kayu, keterbasahan memengaruhi kualitas akhir produk seperti laminasi, pelapisan, atau pengecatan. Dengan memahami keterbasahan kayu, industri dapat mengoptimalkan parameter pemotongan laser agar mendapatkan hasil yang mendukung efisiensi proses pasca-produksi (Zainul, 2024).

3.8.3 Uji Perubahan Warna Kayu

Uji perubahan warna pada kayu yang akan digunakan yaitu sebelum dan sesudah pelaseran kayu dengan menggunakan alat *Colorimeter Amtast AMT507* (Gambar 13).



Gambar 13. *Colorimeter Amtast AMT507*

Perubahan warna yang dinyatakan dengan ΔL^* , Δa^* , Δb^* , dan ΔE^* dapat dihitung menggunakan sistem *CIE-Lab*, yang digunakan untuk mengukur sumbu kecerahan akromatik (L^*), hijau-merah kromatik (a^*), dan biru-kuning kromatik (b^*). Penghitungan perubahan warna ΔL^* , Δa^* , Δb^* , dan ΔE^* dilakukan menggunakan persamaan penilaian perubahan warna berdasarkan parameter warna tersebut (Baar *et al.*, 2019).

Berikut penghitungan perubahan warna :

$$\Delta L^* = L^*1 - L^*0$$

$$\Delta a^* = a^*1 - a^*0$$

$$\Delta b^* = b^*1 - b^*0$$

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

Keterangan:

L^* = Tingkat kecerahan (hitam atau putih)

L^*0 = Kecerahan sampel sebelum pengukiran

L^*1 = Kecerahan sampel sesudah pengukiran

a^* = Kromatisitas (merah atau hijau)

a^*0 = Kromatisitas (merah ke hijau) sebelum pengukiran

a^*1 = Kromatisitas (merah ke hijau) sesudah pengukiran

b^* = Kromatisitas (kuning atau biru)

b^*0 = Kromatisitas (kuning ke biru) sebelum pengukiran

b^*1 = Kromatisitas (kuning ke biru) sesudah pengukiran

ΔL^* = Perbedaan antara nilai L^* sebelum dan sesudah pengukiran

Δa^* = Perbedaan antara nilai a^* sebelum dan sesudah pengukiran

- Δb^* = Perbedaan antara nilai b^* sebelum dan sesudah pengukuran
 ΔE^* = Perubahan warna akibat sebelum dan sesudah pengukuran

Kriteria evaluasi perubahan warna keseluruhan ΔE yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kriteria evaluasi perubahan warna keseluruhan ΔE^*

Nilai Klasifikasi	Keterangan
$0,0 \leq \Delta E^* \leq 0,5$	Perubahan warna samar
$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$	Perubahan warna sedikit
$1,5 < \Delta E^* \leq 3$	Perubahan warna nyata
$3 < \Delta E^* \leq 6$	Perubahan warna besar
$6 < \Delta E^* \leq 12$	Perubahan warna sangat besar
$\Delta E^* > 12$	Warna berubah total secara keseluruhan

Sumber: Valverde and Moya (2014)

3.8.4 Uji Kekasaran Kayu

Uji kekasaran permukaan kayu dilakukan menggunakan *Surface Roughness Tester* (SJ-201, Mitutoyo, Kawasaki Jepang). Alat uji kekasaran permukaan digunakan untuk mengukur tingkat kekasaran pada permukaan papan kayu sengon yang telah melalui proses pemotongan dengan mesin laser CO₂. Pengujian kekasaran dilakukan sebelum dan sesudah proses pelaseran, menggunakan berbagai intensitas daya laser. Kekasaran permukaan diukur berdasarkan sinyal pergerakan stylus yang berbentuk seperti berlian (*diamond*). Stylus bergerak sepanjang garis lurus di permukaan kayu sebagai indikator untuk mengukur tingkat kekasaran benda uji. Prinsip kerja alat uji kekasaran permukaan melibatkan penggunaan transducer yang berfungsi mengonversi energi menjadi bentuk energi lainnya, yang kemudian diproses oleh *microprocessor* untuk menghasilkan data pengukuran (Kilic *et al.*, 2006). Alat ukur uji kekasaran dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. *Surface Roughness Tester*

3.9 Analisis Data

3.9.1 Analisis Statistik Deskriptif

Analisis statistik deskriptif dilakukan menggunakan nilai *S/N Ratio* hasil Taguchi, maksimum, minimum, dan standar deviasi untuk memberikan gambaran umum mengenai karakteristik masing-masing variabel dalam penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Daya dan kecepatan pemotongan menggunakan laser CO₂ terbukti berpengaruh terhadap lebar kerf pada pemotongan kayu sengon (*Falcataria moluccana*). Daya laser yang lebih tinggi cenderung menghasilkan kerf yang lebih lebar, sedangkan kecepatan pemotongan yang lebih tinggi cenderung mempersempit kerf.
2. Terdapat hubungan yang signifikan antara parameter daya dan kecepatan pemotongan dengan perubahan morfologi permukaan kayu sengon. Daya laser yang lebih tinggi meningkatkan perubahan warna (ΔE), tetapi menurunkan kekasaran permukaan. Sementara kecepatan pemotongan yang lebih tinggi cenderung meningkatkan kekasaran dan menurunkan keterbasahan permukaan.
3. Evaluasi hasil pemotongan menunjukkan bahwa kombinasi parameter pemotongan laser CO₂ memengaruhi karakteristik akhir kayu sengon secara menyeluruh, baik dari aspek dimensi fisik potongan maupun kualitas permukaan hasil pemotongan.

5.2. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan parameter lain seperti perbedaan jenis kayu, kadar air dan arah serat kayu. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan hasil yang lebih mendalam terkait interaksi pelaseran terhadap produk kayu.

DAFTAR PUSTAKA

- Amany, R., Rahman, A. F., Febryano, I. G., Iswandaru, D., Suri, I. F., Hidayat, W. 2022. Preferensi konsumen terhadap perubahan warna papan partikel hasil ukir laser CO₂. *Journal of People, Forest and Environment*. 2(2): 51-59. <https://doi.org/10.23960/jopfe.v2i2.5991>
- Arifin, Z. 2018. *Pengaruh Variasi Cutting Speed terhadap Kekasaran Permukaan SUS 304 pada Proses Laser Cutting menggunakan Gas N₂*. Universitas Brawijaya. Malang. 41 hlm.
- Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., Grazieschi, G. 2017. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building And Environment*. 114: 307-332.
- Assyifa, U., Nugraha, D., Febryano, I. G., Duryat, D., Hidayat, W. 2023. Effect of CO₂ laser speed on kerf width and cutting depth of *acacia mangium* wood. *Prosiding Seminar Nasional Masyarakat Biodiversitas Indonesia*. 9(1): 133-136. <https://www.smujo.id/psnmbi/article/view/16008>.
- Baar, J., Paschová, Z., Cermák, P., Wimmer, R. 2019. Color changes of various wood species in response to moisture. *Wood and Fiber Science*. 51(2): 119-131.
- Badruzzaman, B., Baskoro, A. S. 2017. Analisis fabrikasi desain passive mixing microchannel perangkat mikrofluidik material acrylic dengan laser CO₂ daya rendah. *Jurnal Teknologi Terapan*. 2(2): 8-14.
- BPS. 2023. *Produksi Perusahaan Pembudidaya Tanaman Kehutanan Menurut Jenis Produksi: 2020-2022*. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- BPS. 2025. *Statistik Produksi Kehutanan 2023*. Badan Pusat Statistik. Jakarta
- Cahyono, T. D., Wahyudi, I., Priadi, T., Febrianto, F., Ohorella, S. 2017. Sudut kontak dan keterbasahan dinamis kayu samama pada berbagai pengerjaan kayu. *Jurnal Teknik Sipil*. 24(3): 209-216.

- Dayadi, I. 2021. Ketahanan api kayu sengon (*Paraserianthes falcataria* (L.) *nielsen*) yang diawetkan dengan bahan pengawet boraks. *Perennial*. 17(1): 19-25.
- Deraman, A. F. B. 2023. *Synthesis, Characterization and Fire Retardancy of Titania-Based Materials Coated in Wood*. Universiti Teknologi Malaysia. Johor Bahru. 132 hlm.
- Dusseault, M. B. 2009. Monitoring and modelling in coupled geomechanics processes. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 48(7): 6-14.
- Effendi, S., Sani, A. A. 2024. Pengaruh variasi media pelapis terhadap pemotongan akrilik transparan dengan procut diode 15 watt. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*. 9(2): 200-213.
- Eltawahni, H. A., Olabi, A. G., Benyounis, K. Y. 2011. Investigating the CO₂ laser cutting parameters of MDF wood composite material. *Optics and Laser Technology*. 43(3): 648-659.
- Erawati, E., Fernando, A. 2018. Pengaruh jenis aktivator dan ukuran karbon aktif terhadap pembuatan adsorbent dari serbuk gergaji kayu sengon (*Paraserianthes Falcataria*). *Jurnal Integrasi Proses*. 7(2): 58-66.
- Firstiawan, N. 2012. Optimasi parameter proses pemesinan CNC *milling* terhadap kekasaran permukaan kayu jati dengan metode Taguchi. Universitas Sebelas Maret. Surakarta. 81 hlm.
- Gaff, M., Kubovský, I., Sikora, A., Kačíková, D., Li, H., Kubovský, M., Kačík, F. 2023. Impact of thermal modification on color and chemical changes of african padauk, merbau, mahogany, and iroko wood species. *Reviews on Advanced Materials Science*. 62(1): 20220277.
- Genna, S., Menna, E., Rubino, G., Tagliaferri, V. 2020. Experimental investigation of industrial laser cutting: The effect of the material selection and the process parameters on the kerf quality. *Applied Sciences*. 10(14): 4956.
- Ghorbani, Y., Shahi, S. 2016. A new design and fabrication of tapered fiber-based loop mirror as a gain flattened erbium doped fiber amplifier. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. 10(4): 33-37.
- Guo, X., Deng, M., Hu, Y., Wang, Y., Ye, T. 2021. Morphology, mechanism and kerf variation during CO₂ laser cutting pine wood. *Journal of Manufacturing Processes*. 68: 13-22.
- Gurau, L., Irle, M. 2017. Surface roughness evaluation methods for wood products: A review. *Current Forestry Reports*. 3(2): 119-131.

- Harunrasjid, M. C., Aritonang, A. B., Wibowo, M. A., Ardiningsih, P., Adhitiyawarman, A. 2023. Synthesis of Ni Doped-Tio₂ thin film photocatalysts on glass surfaces. *Indonesian Journal of Chemical Analysis (IJCA)*. 6(1): 85-96.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J., Febrianto, F., Kim, N. 2017. Effect of mechanical restraint on the properties of heat-treated *Pinus koraiensis* and *Paulownia tomentosa* woods. *BioResources*. 12(4): 7539-7551.
- Insanimuna, A., Amara, R., Sahrul, S., Nugraha, F. A., Qomariyah, N. N. 2024. Pengaruh variasi waktu impregnasi menggunakan oli bekas terhadap kestabilan dimensi kayu sengon (*Albizia Chinensis*). *Journal of Creative Student Research*. 2(1): 139-155.
- Irianto, R.S.B., Barry, K., Hidayati, N., Ito, S., Fiani, A., Rimbawanto, A., Mohammed, C. 2006. Incidence and spatial analysis of root rot of *Acacia mangium* in indonesia. *Journal of Tropical Forest Science*. 18(3): 157-165.
- Ismail, M. 2012. *Analisis Fabrikasi Perangkat Mikrofluidik pada Material Acrylic menggunakan Laser CO₂ Daya Rendah*. FT UI. Jakarta. 67 hlm.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan 2020. *Direktorat Jenderal Pengendalian DAS dan Hutan Lindung*. Direktorat Jenderal Pengendalian DAS dan Hutan Lindung. Jakarta
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan 2021. Empat pesan Menteri LHK pada peringatan hari hutan internasional. diambil dari <https://mediaindonesia.com/humaniora/394621/empat-pesan-menteri-lhk-pada-peringatan-hari-hutan-internasional#googrewarded>
- Kilic, M., Hiziroglu, S., Burdurlu, E. 2006. Effect of machining on surface roughness of wood. *building and environment*. 41(8): 1074-1078.
- Kúdela, J., Andrejko, M., Kubovský, I. 2023. The effect of CO₂ laser engraving on the surface structure and properties of *spruce* wood. *Coatings*.13(12): 2006.
- Kurzinski, S., Crovella, P. L. 2023. Theoretical and experimental investigation on predicting longitudinal and tangential elastic constants and ratios of wood. in *Proceedings of The World Conference on Timber Engineering. WCTE*: 376-382.
- Latif, M., Rahmawati, D. 2025. *Dasar Konstruksi Kayu*. Buku. Jakad Media Publishing. Surabaya. 106 hlm.
- Lessy, I., Ohorella, S., Karepesina, S. 2018. Sifat fisis kayu sengon (*Paraserianthes Falcataria* L. Nielsen) pada lahan agroforestry di Ambon, Maluku. *Jurnal Agrohut*. 9(1): 1-11.

- Lestari, A. T. 2020. Sifat keterbasahan pada bidang tangensial dan radial kayu rajumas (*Duabanga moluccana Blume*). *Jurnal Perennial*. 16(1): 7-10.
- Luthfi, K. M., Sugiana, A., Suratman, F. Y. 2021. Broken rail detection system using laser. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1098(4): 42-45.
- Manoharan, K., Bhattacharya, S. 2019. Superhydrophobic surfaces review: functional application, fabrication techniques and limitations. *Journal of Micromanufacturing*. 2(1): 59-78.
- Manurung, H.M. 2013. *Pengukuran Daya Laser CO₂ dan Laser DPSS Serta Pengamatan Beam Profiler Sinar Laser DPSS dan Laser He-Ne Menggunakan CCD*. Skripsi. Universitas Sumatera Utara. Medan. 88 hlm.
- Marimuthu, S., Antar, M., Dunleavy, J. 2019. Characteristics of micro-hole formation during fibre laser drilling of aerospace superalloy. *Precision Engineering*. 55(34): 339-348.
- Ma'ruf, S. D., Bakri, S., Febryano, I. G., Setiawan, A., Haryanto, A., Suri, I. F., Hidayat, W. 2023. Effects of Temperature during Oil Heat Treatment on the Quality Improvement of Mindi (*Melia azedarach*) and Sengon (*Falcataria moluccana*) Woods. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 12(1): 255–267. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v12i1.255-267>.
- Maulana, M. I., Fitriani, F., Noviyanti, D., Audy, R., Prasetya, D., Maulana, S., Lubis, M. A. R., Hidayat, W., Sari, R. K., Febrianto, F., Kim, N. H. 2023. Effect of pretreatment and compaction ratio on the properties of oriented strand board from sengon (*Paraserianthes falcataria* L. Nielsen) wood. *Wood Material Science & Engineering*, 19(1): 206–219. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2233952>.
- Meijer, R. A., Stodolna, A. S., Eikema, K. S. E., Witte, S. 2017. High-energy Nd: YAG laser system with arbitrary sub-nanosecond pulse shaping capability. *Optics Letters*. 42(14): 2758-2761.
- Miyoshi, Y., Kojiro, K., Furuta, Y. 2018. Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension. *Journal of Wood Science*. 64(5): 509-514.
- Nugraha, M. D., Iswandaru, D., Duryat, D., Hidayat, W. 2024. Optimization of CO₂ laser cutting variables of sengon plywood (*Paraserianthes falcataria*) using response surface methodology. *Journal of Sylva Indonesiana*. 7(2): 97-109. <https://doi.org/10.32734/jsi.v7i02.14850>
- Nugroho, A., Hutama, A. S., Budiyanoro, C. 2018. Optimasi keakuratan dimensi dan kekasaran permukaan potong material akrilik dengan proses laser

- menggunakan metode Taguchi dan PCR-TOPSIS. *JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur)*. 2(2): 75-82.
- Novita, S., Iwantono, I., Awidrus, A. 2017. Karakterisasi sifat optik dan morfologi Nanorod Zno yang di doping Galium (Zno; Ga). *Indonesian Physics Communication*. 14(1): 939-944.
- Ogana, R. M. 2018. Pengaruh *Variasi Cutting Speed Terhadap Kekasaran Permukaan Ss316l Pada Proses Laser Cutting*. Dissertation. Universitas Brawijaya. Malang. 33 hlm.
- Pasai, M. 2020. Dampak kebakaran hutan dan penegakan hukum. *Jurnal Pahlawan*. 3(1): 36-46.
- Perbawa, D. A., Akbar, A., Firdaus, R., Mulyadi, M. 2025. Analisis kinerja mesin circular saw berorientasi potong 45-90 derajat untuk aplikasi industri kayu studi eksperimental. *Jurnal Mesin Nusantara*. 8(1): 125-136.
- Perhutani, 2024. Kayu Sengon. <https://www.perhutani.co.id/product/kayu-sengon/>. diakses pada tanggal 6 Juli 2025.
- Priadi, T. 2005. *Pelapukan Kayu Oleh Jamur dan Strategi Pengendaliannya*. Penerbit Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Pujaningsat, B. 2018. *Pengaruh hasil potong dengan variasi tip dan kecepatan potong menggunakan gas oxy acetylene terhadap kekasaran dan kekerasan permukaan baja ASTM A-36*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya. 73 hlm.
- Pujirahayu, N., Hadjar, N., Hamzah, N. 2024. Uji Kadar air titik jenuh serat beberapa jenis kayu perdagangan di Kabupaten Konawe Selatan. *Jurnal Celebica: Jurnal Kehutanan Indonesia*. 5(1): 75-82.
- Purwanto, D. 2012. Pemanfaatan kayu akasia mangium (*Acacia mangium Willd*) untuk mebel. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 4(1): 1-8.
- Putri, A. R., Munasir, M. 2023. Lapisan superhidrofobik berbasis silika sebagai aplikasi *self-cleaning*. *Inovasi Fisika Indonesia*. 12(2): 66-81.
- Qin, Z., Gao, Q., Zhang, S., Li, J. 2014. Surface free energy and dynamic wettability of differently machined poplar woods. *Bioresources*. 9(2): 3088-3103.
- Rahman, A. F., Amany, R., Suri, I. F., Febryano, I. G., Duryat, D., Hidayat, W. 2023. Pengaruh Daya Laser CO₂ terhadap Perubahan Warna Permukaan Kayu Meranti (*Shorea Sp.*) dan Preferensi Konsumen. *Journal of People, Forest and Environment*, 2(2): 60-68. <https://doi.org/10.23960/jopfe.v2i2.5992>.

- Rahman, A. F. 2022. *Pengaruh daya laser CO₂ terhadap kekasaran permukaan dan warna permukaan kayu sengon (Paraserianthes falcataria) dan kayu meranti (Shorea Spp.)*. Universitas Lampung. Bandarlampung. 45 hlm.
- Rahmawati, D., Khumaida, N., Siregar, U. J. 2019. Morphological and phytochemical characterization of susceptible and resistant sengon (*Falcataria moluccana*) tree to gall rust disease. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. 20(3): 907-913.
- Ramadhan, J. S. 2015. *Uji ketahanan kayu sengon (Paraserianthes falcataria (L) Nielsen) yang di pres terhadap rayap tanah (Coptotermes Gestroi)*. Universitas Negeri Jakarta. Jakarta. 83 hlm.
- Ridjayanti, S. M., Bazenet, R. A., Hidayat, W., Banuwa, I. S., Riniarti, M. 2021. Pengaruh Variasi Kadar Perekat Tapioka Terhadap Karakteristik Briket Arang Limbah Kayu Sengon (*Falcataria moluccana*): The Influence of Adhesive Content Variation on the Characteristics of Sengon (*Falcataria moluccana*) Wood Charcoal Briquettes. *Perennial*, 17(1): 5–11. <https://doi.org/10.24259/perennial.v17i1.13504>
- Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., Wijaya, B. A. 2025. The influence of pyrolysis temperature and dosage of shorea wood biochar produced on soil properties and sengon (*Falcataria moluccana*) seedling biomass. *Menara Perkebunan*, 93(1): 57-67. <https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v93i1.611>
- Rizky, T., Fikri, A., Nasuha, C. N. 2022. Kekuatan tarik plywood dari bahan sengon (*Albizia Chinensis*). *Jurnal Fakultas Teknik UNISA Kuningan*. 3(2): 455882.
- Ružiak, I., Igaz, R., Kubovský, I., Gajtanska, M., Jankech, A. 2022. Prediction of the effect of CO₂ laser cutting conditions on spruce wood cut characteristics using an artificial neural network. *Applied Sciences*. 12(22): 11355.
- Samarya, Y. T., Sulianti, M. M., Angin, B. P., Situmorang, M. 2020. Aplikasi laser CO₂ untuk pemotongan (*cutting*) material menggunakan mesin CNC (*control numeric computer*). Tersedia di <https://media.neliti.com/media/publications/221366-none.pdf> diakses pada tanggal, 21-03.
- Samarya, Y. T., Sulianti, M. M., Angin, B. P., Situmorang, M. 2013. Aplikasi laser CO₂ untuk pemotongan (*cutting*) material menggunakan mesin CNC (*control numeric computer*). *Saintia Fisika*. 5(1): 1-5.
- Samboro, M. A., Sriwarno, A. B., Djati, I. D. 2017. Material efficiency of wood waste industries to design by using laser cutting technology (pine, sungkai, sengon, and kamper wood). in *1st International Conference on Art, Craft, Culture and Design 2017*. Bandung Institute of Technology. Bandung.
- Santosa HB. 1992. *Budidaya Sengon*. Buku. Kanisius. Yogyakarta. 50 hlm.

- Sari, R. K., Fitriani, F., Maulana, M. I., Hidayat, W., Winarni, I., Iswanto, A. H., Lubis, M. A. R. 2024. Hydrolytic Stability of Sengon-Oriented Strand Board Bonded with Hybrid Phenol-Formaldehyde/Polymeric Methylene Diphenyl Diisocyanate Adhesives. *Jurnal Sylva Lestari*. 12(3): 818–831.
- Sari, W. P., Ardi, A., Efendi, S. 2020. Analisis vegetasi gulma pada beberapa kelas umur *Acacia mangium* Willd. di hutan tanaman industri (HTI). *Jurnal Hutan Tropis*. 8(2):185-194.
- Sekartaji, N., Sumartono, B., Arianto, B. 2021. Analisis pengendalian kualitas produk damper speaker type D-25236 B menggunakan metode six sigma guna meminimalisir produk cacat pada PT. X. *Jurnal Teknik Industri*. 7(2).
- Shi, S. Q., Gardner, D. J. 2001. Dynamic adhesive wettability of wood. *Wood and Fiber Science*. 58-68.
- Sihombing, F. W. 2024. *Pengaruh Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit Terhadap Beberapa Sifat Kimia Tanah Pada Bekas Tambang Batubara dan Pertumbuhan Tanaman Sengon Solomon* Dissertation. Universitas Jambi. Jambi
- Stevanie, N. 2020. *Evaluasi Perubahan Jumlah Endotel Kornea, Ketebalan Kornea Sentral dan Kedalaman Bilik Mata Depan Pada Pasien Posterior Capsular Opacity Pasca Nd: Yag Laser*. Dissertation. Universitas Hasanuddin. Makassar
- Subari, D. 2014. Sustainability hutan tanaman industri sengon (*Albizia falcataria*). *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 6(1): 9-14.
- Suharto, I., Saputra, M. P. D. E. 2021. *Monograf Prototipe Mesin CNC Laser Gas CO₂-40 Watt Untuk Pembuatan Produk Kreatif: Bintang Pustaka*. Buku. Bintang Pustaka Madani. Yogyakarta.
- Suri, I. F., Nugraha, M. D., Al Qorny, F., Febryano, I. G., Hidayat, W. (2025). Pengaruh Variasi Daya Laser CO₂ terhadap Perubahan Warna Permukaan dan Preferensi Konsumen pada Kayu Cempaka (*Michelia champaca*). *Jurnal Nusa Sylva*, 25(1): 23–32. <https://doi.org/10.31938/jns.v25i1.849>
- Susanto, M., Naiem, M., Hardiyanto, E. B., Prayitno, T. A. 2013. Variasi genetik sifat-sifat kayu uji keturunan *Acacia mangium* umur 5 tahun di wonogiri, Jawa Tengah. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*. 20(3): 312-323.
- Tang, L., Zhang, R., Zhou, X., Pan, M., Chen, M., Yang, X., Chen, Z. 2012. Dynamic adhesive wettability of poplar veneer with cold oxygen plasma treatment. *Bioresources*. 7(3): 3327-3339.
- Tanubrata, M. 2015. Bahan-Bahan Konstruksi Dalam Konteks Teknik Sipil. *Jurnal Teknik Sipil*. 11(2): 132-154.

- Tarigan, A. A. L. B., Riniarti, M., Prasetya, H., Hidayat, W., Niswati, A., Banuwa, I. S., Hasanudin, U. 2021. Pengaruh Biochar pada Simbiosis Rhizobium dan Akar Sengon Laut (*Paraserianthes falcataria*) dalam Media Tanam. *Journal of People, Forest and Environment*, 1(1): 11–20. <http://jurnal.fp.unila.ac.id/index.php/jopfe/article/view/4493>
- Utama, R. C., Febryano, I. G., Herwanti, S., Hidayat, W. 2019. Saluran Pemasaran Kayu Gergajian Sengon (*Falcataria moluccana*) pada Industri Penggergajian Kayu Rakyat di Desa Sukamarga, Kecamatan Abung Tinggi, Kabupaten Lampung Utara. *Jurnal Sylva Lestari*, 7(2): 195–203. <https://doi.org/10.23960/jsl27195-203>
- Valverde, J. C, Moya, R. 2014. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in *Acacia mangium*, *Cedrela odorata* and *Tectona grandis* wood with two coating. *Color Research and Application*. 39(5): 519–529.
- Wei, S., Shi, J., Gu, J., Wang, D., Zhang, Y. 2012. Dynamic wettability of wood surface modified by acidic dyestuff and fixing agent. *Applied Surface Science*. 258(6): 1995–1999.
- Wiguna, G. A., Kelen, Y. R. L. 2018. Implementasi visual basic 6.0 untuk pengukuran sudut kontak menggunakan pendekatan geometri dua lingkaran. *Jurnal Ipteks Terapan*. 12(2): 107–115.
- Wijaya, B. A., Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Kim, S., Lee, S., Yoo, J. 2022. Meranti (*Shorea* sp.) Biochar Application Method on the Growth of Sengon (*Falcataria moluccana*) as a Solution of Phosphorus Crisis. *Energies*, 15(6): 2110. <https://doi.org/10.3390/en15062110>
- Wijaya, B. A., Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., Yoo, J., Park, B. B. 2025. Field Evaluation of Biochar Application on the Early Growth of *Falcataria moluccana*: Effects of Pyrolysis Temperatures and Biochar Application Rates. *Jurnal Sylva Lestari*, 13(1): 248–263. <https://doi.org/10.23960/jsl.v13i1.1134>
- Wijaya, B. A., Riniarti, M., Prasetya, H., Hidayat, W., Niswati, A., Hasanuddin, U., Banuwa I, S. 2021. Interaksi Perlakuan Dosis dan Suhu Pirolisis Pembuatan Biochar Kayu Meranti (*Shorea spp.*) mempengaruhi Kecepatan Tumbuh Sengon (*Paraserianthes moluccana*). *Jurnal Hutan Tropis*; 5(2): 86–97. <http://dx.doi.org/10.32522/ujht.v5i2.5782>
- Wulandari, F., Amin, R. 2023. Analisis kelas kuat papan laminasi kombinasi kayu sengon dan bambu petung: analysis of strength class of laminated board of combination of sengon wood and petung bamboo. *Hutan Tropika*. 18(2): 218–225..

- Wulandari, F. T., Amin, R., Raehanayati, R. 2022. Karakteristik sifat fisika dan mekanika papan laminasi kayu sengon dan kayu bayur. *Euler: Jurnal Ilmiah Matematika, Sains dan Teknologi*. 10(1): 75-87.
- Yama, D, Muin, A, Wulandari, R. S. 2014. Asosiasi cendawan mikoriza arbuskula (CMA) pada tegakan akasia (*Acacia crassicaarpa* A. Cunn. Ex Benth) di lahan gambut pt. kalimantan subur permai kabupaten kubu raya kalimantan Barat. *Jurnal Hutan Lestari*. 2(1): 33-40.
- Yulianto, D. E. 2018. Hutan tanaman industri sebagai metode pengembangan ekonomi dan lingkungan masyarakat di desa tambak ukir kecamatan kendit kabupaten situbondo. *Integritas: Jurnal Pengabdian*. 2(2): 117-128.
- Yunita, E., Riniarti, M., Hidayat, W., Niswati, A., Prasetya, H., Banuwa, I. S., Hasanudin, U. 2021. Pengaruh penambahan enkapsul biochar tandan kosong kelapa sawit terhadap perkembangan akar sengon (*Falcataria moluccana*). Prosiding. Seminar Nasional Silvikultur VIII. Bandarlampung. 140.
- Yunita, R. S., Riniarti, M., Hidayat, W., Niswati, A., Prasetya, H., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Yunita, E., Rizkasumarta, F. 2023. Improvement of Falcataria moluccana Root Growth by Giving Empty Palm Oil Fruit Bunches (EFB) Biochar in Growing Media. *Journal of Sylva Indonesiana*, 6(1): 10–18. <https://doi.org/10.32734/jsi.v6i01.7670>
- Zainul, R. 2024. *Elektrokimia Dalam Pembuatan dan Karakterisasi Bahan Berbasis Karbon*. PT. Rajagrafindo Persada-Rajawali Pers. Depok.
- Zhang, Y., Zhang, Z., Yang, J., Yue, Y., Zhang, H. 2021. A review of recent advances in superhydrophobic surfaces and their applications in drag reduction and heat transfer. *Nanomaterials*. 12(1): 44.