

**PENGARUH PEMOTONGAN DENGAN LASER CO₂ TERHADAP
GARITAN (*Kerf*) DAN MORFOLOGI KAYU MANGIUM
(*Acacia mangium*)**

(Skripsi)

Oleh

**UKHTI ASSYIFA
1914151091**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

PENGARUH PEMOTONGAN DENGAN LASER CO₂ TERHADAP GARITAN (*Kerf*) DAN MORFOLOGI KAYU MANGIUM (*Acacia mangium*)

Oleh

UKHTI ASSYIFA

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kedalaman garitan, lebar garitan dan lebar berdasarkan kedalaman serta morfologi garitan selama pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) menggunakan laser CO₂. Rancangan penelitian menggunakan rancangan acak lengkap faktorial yang terdiri dari tiga perlakuan antara lain, kecepatan (3 mm/s, 5 mm/s, 7 mm/s dan 9 mm/s), kadar air (kayu kering oven dan kayu kering udara) dan arah potong (sejajar arah serat dan tegak lurus arah serat). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedalaman garitan yang dihasilkan dari pemotongan kayu mangium dengan laser CO₂ dipengaruhi oleh kecepatan, kadar air dan arah potong. Semakin rendah kecepatan pemotongan maka kedalaman garitan yang dihasilkan lebih dalam. Kayu kering oven menghasilkan kedalaman garitan yang lebih dalam dibandingkan kayu kering udara. Pemotongan sejajar arah serat menghasilkan kedalaman garitan yang lebih dalam dibandingkan pemotongan tegak lurus arah serat. Lebar garitan juga dipengaruhi oleh kecepatan, kadar air dan arah potong. Semakin rendah kecepatan pemotongan maka lebar garitan yang dihasilkan lebih besar. Kayu kering oven menghasilkan lebar garitan yang lebih besar dibandingkan kayu kering udara. Pemotongan sejajar arah serat menghasilkan garitan yang lebih besar dibandingkan pemotongan tegak lurus arah serat. Lebar berdasarkan kedalaman juga dipengaruhi oleh kecepatan, kadar air dan arah potong. Semakin rendah kecepatan pemotongan

maka lebar berdasarkan kedalaman yang dihasilkan lebih besar. Kayu kering oven menghasilkan garitan yang lebih besar dibandingkan kayu kering udara. Pemotongan sejajar arah serat akan menghasilkan garitan yang lebih besar dibandingkan pemotongan tegak lurus arah serat. Garitan yang dihasilkan pada pemotongan menggunakan laser menghasilkan bentuk V yang bergelombang. Garitan berbentuk V yang bergelombang terjadi karena garitan yang tidak beraturan melewati kayu awal dan kayu akhir.

Kata kunci: Kayu mangium, Laser CO₂, Kedalaman garitan, Lebar garitan, Lebar berdasarkan kedalaman

ABSTRACT

THE EFFECT OF CO₂ LASER CUTTING ON KERF AND THE MORPHOLOGY OF MANGIUM WOOD (*Acacia mangium*)

By

UKHTI ASSYIFA

*This research was conducted with the aim of knowing the kerf depth, kerf width and width based on the depth and kerf morphology when cutting *Acacia mangium* wood using a CO₂ laser. The research design used a factorial complete randomized design consisting of three treatments, speed (3 mm/s, 5 mm/s, 7 mm/s and 9 mm/s), moisture content (oven-dried wood and air-dried wood) and direction of cutting (parallel to the grain direction and perpendicular to the grain direction). The results showed that the kerf depth resulting from cutting mangium wood with a CO₂ laser was influenced by speed, moisture content and cutting direction. The lower the cutting speed, the deeper the kerf depth produced. Oven-dried wood produces deeper kerf depths than air-dried wood. Cutting parallel to the grain produces a deeper kerf depth than cutting perpendicular to the grain. The width of the kerf is also affected by the speed, moisture content and direction of cutting. The lower the cutting speed, the greater the resulting kerf width. Oven-dried wood produces a larger kerf width than air-dried wood. Cutting parallel to the grain produces a larger kerf than cutting perpendicular to the grain. Width based on depth is also affected by speed, moisture content and cutting direction. The lower the cutting speed, the greater the resulting width based on the depth. Oven-dried wood produces more kerf than air-dried wood. Cutting parallel to the grain will produce a larger kerf than cutting perpendicular to the grain. The kerf produced by*

laser cutting produces a wavy V shape. A wavy V-shaped kerf occurs because the kerf is irregular through the early and late wood.

Keywords: Mangium wood, Laser CO₂, Kerf depth, Kerf width, Width based on depth

**PENGARUH PEMOTONGAN DENGAN LASER CO₂ TERHADAP
GARITAN (*Kerf*) DAN MORFOLOGI KAYU MANGIUM
(*Acacia mangium*)**

Oleh

UKHTI ASSYIFA

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar
SARJANA KEHUTANAN**

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : **PENGARUH PEMOTONGAN DENGAN
LASER CO₂ TERHADAP GARITAN (*Kerf*)
DAN MORFOLOGI KAYU MANGIUM
(*Acacia mangium*)**

Nama Mahasiswa : **Ukhti Assyifa**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1914151091

Program Studi : Kehutanan

Fakultas : Pertanian

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

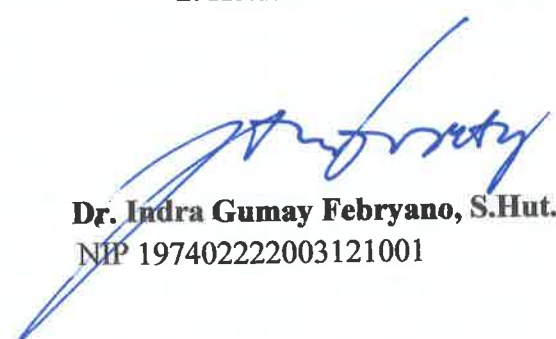


Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.
NIP 197911142009121001



Duryat, S.Hut., M. Sc.
NIP 197802222001121001

2. Ketua Jurusan Kehutanan

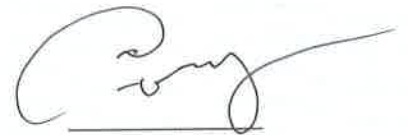


Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si.
NIP 197402222003121001

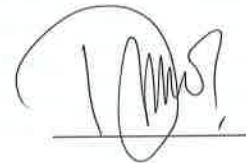
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.



Sekretaris : Duryat, S.Hut., M.Sc.



**Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Indra Gumay F, S.Hut., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Pertanian



Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si.
NIP 196110201986031002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 29 Mei 2023

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ukhti Assyifa

NPM : 1914151091

Jurusan : Kehutanan

Alamat Rumah : Jalan Kamil, NO 1049 RT 20 RW 03, Sukabangun,
Sukarame, Palembang, Sumatera Selatan

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sesungguhnya, bahwa skripsi saya yang berjudul: **“Pengaruh Pemotongan dengan Laser CO₂ terhadap Garitan (*Kerf*) dan Morfologi Kayu Mangium (*Acacia mangium*)”**

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 dikemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar sarjana maupun tuntutan hukum.

Bandar Lampung, 11 Juni 2023
Yang membuat pernyataan



Ukhti Assyifa
NPM 1914151091

RIWAYAT HIDUP



Ukhti Assyifa atau akrab disapa Syifa, lahir di Palembang, 27 September 2001. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Tedi Arman dan Ibu Fustawati. Penulis menempuh pendidikan di TK 'Aisyiyah 4 Palembang yang diselesaikan pada tahun 2007, SD Muhammadiyah 14 Palembang yang diselesaikan pada tahun 2013, MTsN 2 Palembang yang diselesaikan pada tahun 2016, dan SMAN 3 Palembang yang diselesaikan pada tahun 2019. Tahun 2019 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 organisasi Himpunan Mahasiswa Jurusan Kehutanan (Himasyilva) sebagai Anggota. Penulis pernah menjadi Anggota bagian Sekretaris Kabinet di Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) XVI pada tahun 2020. Selama perkuliahan, penulis pernah menjadi Asisten Praktikum mata kuliah Kimia Dasar tahun 2021 dan Asisten Praktikum mata kuliah Hidrologi Hutan tahun 2022. Penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada bulan Januari-Februari tahun 2022 di Desa Kepur, Kecamatan Muara Enim, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Penulis pernah melaksanakan kegiatan Praktik Umum di Kampus Lapangan Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada, Desa Getas, Jawa Tengah dan di Hutan Pendidikan Wanagama 1 pada bulan Agustus 2022 selama 20 hari. Penulis pernah menjadi pemakalah pada kegiatan Seminar Nasional Masyarakat Biodiversitas Indonesia tahun 2023 dengan judul "Pengaruh Kecepatan Laser CO₂ Terhadap Lebar Garitan dan Kedalaman Pemoangan Kayu *Acacia mangium*".

“Teruntuk Ayah dan Mama Tersayang”

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas berkat dan rahmat-Nya, tidak lupa shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta para sahabatnya hingga ke akhir zaman. Penulis telah menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Pemotongan dengan Laser CO₂ terhadap Garitan (*Kerf*) dan Morfologi Kayu Mangium (*Acacia mangium*)” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana kehutanan pada Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian skripsi. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya dengan segala kerendahan hati kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung atas waktu yang telah diberikan kepada penulis untuk kesempurnaan skripsi ini.
2. Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan selaku pembahas yang telah memberikan bimbingan, kritik, saran dan motivasi kepada penulis.
3. Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing pertama, atas segala kesediaannya untuk memberikan bimbingan, motivasi, ilmu, kritik dan saran, dengan penuh kesabaran selama proses menyelesaikan skripsi ini.
4. Duryat S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing kedua, atas segala kesediaannya untuk memberikan bimbingan, motivasi, ilmu, kritik dan saran, dengan penuh kesabaran selama proses menyelesaikan skripsi ini.
5. Dr. Rudi Hilmanto, S.Hut., M.Si. selaku dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan masukan dan motivasi kepada penulis selama menempuh perkuliahan.

6. Bapak dan Ibu Dosen serta tenaga kependidikan Jurusan Kehutanan yang telah memberikan ilmu pengetahuan, dan membantu penulis selama menempuh masa perkuliahan.
7. Kedua orang tua penulis, Ayah Tedi Arman dan Mama Fustawati, yang telah memberikan dukungan, membesarkan dan mendidik penulis hingga bisa sampai dititik ini
8. Adik penulis, Rizqa Rahhima Syafitri yang selalu memberikan semangat, motivasi, dan dukungan.
9. Intan Fajar Suri, S.Hut., M.Sc. yang telah membimbing dan memberikan masukan serta arahan selama penulis melakukan penelitian.
10. Tim konsentrasi Teknologi Hasil Hutan (THH), Lusy Rahmawati, Hade Afkar, Daffa Naufalian F, Porto Mauritio, M. Dimaz Nugraha dan M. Alfaridzi yang telah membantu dan memberikan semangat kepada penulis.
11. Teman dekat penulis, Lusy Rahmawati, Adelia Anggraini, Dita Hydayah dan Vina Puspita Dewi, Alim Fadila Rahman yang telah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis pada masa-masa perkuliahan dan penyelesaian skripsi.
12. Palembang *Squad*, Nuriyah Azmi, Maghfirah Rizki dan Nabila Irzanti yang telah kebersamai dari awal perkuliahan sampai dengan saat ini.
13. Teman-teman seperjuangan angkatan 2019 (FORMICS) serta seluruh keluarga besar Himasyiva, semoga kebersamaan, kekeluargaan, dan tali silaturahmi dapat terus terjalin dengan baik.
14. Serta kepada segala pihak yang terlibat dalam proses penelitian dan penyusunan skripsi baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan yang telah diberikan. Penulis berharap kritik dan saran yang membangun untuk kesempurnaan skripsi ini. Mudah-mudahan skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Bandar Lampung, Mei 2023

Ukhti Assyifa

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR LAMPIRAN	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	5
1.3. Kerangka Pemikiran.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Hutan Tanaman Industri.....	8
2.2. Gambaran Umum Mangium (<i>Acacia mangium</i>).....	10
2.3. Sifat Kayu	12
2.4. Struktur Kayu	12
2.5. Garitan (<i>Kerf</i>).....	13
2.6. Laser.....	13
2.7. Jenis-Jenis Laser.....	14
2.7.1. Laser <i>Diode-Pumped Solid State</i> (DPSS)	15
2.7.2. Laser <i>Helium Neon</i> (He-Ne)	15
2.7.3. Laser CO ₂	16
2.8. Bagian-Bagian Laser CO ₂	17
III. METODE PENELITIAN	18
3.1 Waktu dan Tempat	18
3.2. Alat dan Bahan.....	18
3.3. Rancangan Penelitian	18

3.4. Parameter Penelitian.....	19
3.5. Prosedur Penelitian.....	19
3.5.1. Persiapan Alat	19
3.5.2. Persiapan Bahan	21
3.5.3. Pelaseran Papan Kayu Mangium (<i>Acacia mangium</i>).....	22
3.6. Pengujian Hasil Cutting Dengan Mikroskop	23
3.6.1. Kedalaman dan Lebar Garitan	23
3.6.2. Morfologi Garitan	24
3.7. Analisis Data	24
3.7.1. Uji Homogenitas	24
3.7.2. Analisis Varian (ANOVA).....	25
3.7.3. Uji Beda Nilai Tengah Perlakuan	26
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1. Karakteristik Bahan.....	27
4.1.1. Kadar Air.....	27
4.1.2. Kerapatan	27
4.2. Pengaruh Parameter Proses Terhadap Kedalaman Garitan.....	28
4.2.1. Pengaruh Kecepatan Pemotongan Terhadap Kedalaman Garitan	29
4.2.2. Pengaruh Kadar Air Terhadap Kedalaman Garitan	30
4.2.3. Pengaruh Arah Potong Terhadap Kedalaman Garitan	31
4.3. Pengaruh Parameter Proses Terhadap Lebar Garitan.....	31
4.3.1. Pengaruh Kecepatan Pemotongan Terhadap Lebar Garitan	32
4.3.2. Pengaruh Kadar Air Terhadap Lebar Garitan	33
4.3.3. Pengaruh Arah Potong Terhadap Lebar Garitan	35
4.4. Pengaruh Parameter Proses Lebar Berdasarkan Kedalaman	35
4.4.1. Pengaruh Kecepatan Pemotongan Terhadap Lebar Berdasarkan	
Kedalaman	39
4.4.2. Pengaruh Kadar Air Terhadap Lebar Berdasarkan Kedalaman	39
4.4.3. Pengaruh Arah Potong Terhadap Lebar Berdasarkan Kedalaman	40
4.5. Morfologi Garitan	42
V. KESIMPULAN.....	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Layout rancangan acak lengkap tiga faktor	25
2. Kadar air kayu mangium (<i>Acacia mangium</i>)	27
3. Kerapatan kayu mangium (<i>Acacia mangium</i>).....	28
4. Uji statistik pada kedalaman garitan	28
5. Uji statistik pada lebar garitan	32
6. Uji statistik pada lebar berdasarkan kedalaman (atas)	36
7. Uji DMRT pada lebar berdasarkan kedalaman (atas)	37
8. Uji statistik pada lebar berdasarkan kedalaman (tengah).....	37
9. Uji DMRT pada lebar berdasarkan kedalaman (tengah).....	38
10. Uji statistik pada lebar berdasarkan kedalaman (bawah).....	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran	7
2. Laser Diode-Pumped Solid State (DPSS).....	15
3. Laser Helium Neon (He-Ne).....	16
4. Mesin Laser CO ₂	17
5. Bagian Mesin Laser CO ₂	20
6. Software Corel Draw Laser.....	21
7. Skema dari arah pemotongan Laser CO ₂	23
8. Skema pemotongan laser.	23
9. Metode yang digunakan untuk mengukur dimensi kedalaman garitan dan lebar garitan menggunakan mikroskop stereo	24
10. Pengaruh kecepatan pemotongan terhadap kedalaman garitan.....	29
11. Hasil pemotongan kedalaman garitan pada kecepatan 3 mm/s, 5 mm/s, 7 mm/s, 9 mm/s	30
12. Perbandingan pengaruh kadar air terhadap kedalaman garitan.....	30
13. Perbandingan pengaruh arah potong terhadap kedalaman garitan.....	31
14. Lebar garitan pada kecepatan 3 mm/s, 5 mm/s, 7 mm/s dan 9 mm/s (kayu perlakuan kering udara dan sejajar arah serat)	32
15. Pengaruh kecepatan pemotongan terhadap lebar garitan	33
16. Perbandingan pengaruh kadar air terhadap lebar garitan	34
17. Perbedaan secara mikrograf optik lebar garitan pada kecepatan yang sama pada kayu yang di: (a) kering oven dan (b) kering udara	34
18. Perbandingan pengaruh arah potong terhadap lebar garitan	35
19. Skema pengukuran bagian lebar berdasarkan kedalaman.....	36
20. Pengaruh kecepatan terhadap lebar berdasarkan kedalaman	39

21. Perbandingan pengaruh kadar air terhadap lebar berdasarkan kedalaman	40
22. Perbandingan pengaruh kadar air terhadap lebar berdasarkan kedalaman	41
23. Mikrograf optik dari permukaan kedalaman garitan dengan arah serat berbeda: (a) sejajar arah serat, (b) tegak lurus arah serat.....	41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Dokumentasi penelitian.....	52

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini industri-industri dominan melakukan pekerjaan dengan mesin namun masih banyak sekali industri yang menggunakan proses manual (Syarief dan Gumai, 2017; Utama *et al.*, 2019). Sedangkan kegiatan penggergajian yang dilakukan secara manual memiliki produktivitas rendah (Wibawa *et al.*, 2018). Selain digunakan sebagai jaminan kualitas produk, pemanfaatan teknologi permesinan juga digunakan untuk meningkatkan produktivitas (Slamet *et al.*, 2021). Masalah yang sering terjadi di dalam industri penggergajian adalah limbah serbuk kayu akibat dari proses penggergajian kayu yang memanfaatkan teknologi mesin maupun secara manual (Purba *et al.*, 2017). Limbah serbuk kayu hasil pengolahan industri kayu biasanya dibiarkan menumpuk begitu saja tanpa dilakukannya pemanfaatan atau pengelolaan lanjutan dari hasil industri tersebut. Dalam mengatasi masalah ini, Sulton (2021) melaporkan bahwa alternatif yang bisa dilakukan yaitu dengan menggunakan mesin yang tidak menghasilkan limbah serbuk kayu yaitu dengan menggunakan mesin CNC dan Laser CO₂.

Teknologi alternatif yang salah satunya dapat diterapkan dalam pemotongan kayu adalah Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Pesatnya kemajuan teknologi mendorong peningkatan penggunaan teknologi laser di berbagai bidang, misalnya pada di bidang manufaktur, seni, medis, dan percetakan. Banyak sekali jenis-jenis laser yang dapat kita temui di pasaran, akan tetapi dalam pemanfaatannya dalam di bidang manufaktur yang sering kali ditemukan adalah Laser CO₂ (Halim *et al.*, 2022). Awal mula penggunaan laser CO₂ yaitu pada 1965, yang awalnya dimanfaatkan untuk pengeboran lubang berlian dengan menggunakan teknologi mesin *laser cutting* (laser pemotong). Mesin ini

diciptakan oleh Pusat Penelitian Teknik *Western Electric* pada tahun 1967, Inggris yang memelopori laser jet pada logam (Arifin, 2018).

Dalam perkembangannya teknologi pemotongan laser CO₂ telah berkembang untuk berbagai kegiatan guna memenuhi kebutuhan industri karena efisiensinya dan mekanisme yang ramah pengguna (Ibrahim *et al.*, 2018). Laser yang memiliki banyak kegunaan seperti untuk memproses logam dan non logam, termasuk pemotongan, pengelasan, perawatan permukaan, pengeboran, permesinan mikro dan dapat mengidentifikasi objek sebagai sumber cahaya (Xu *et al.*, 2017). Penggunaan laser CO₂ untuk pemotongan kayu memiliki peluang di masa depan karena pemotongan material dengan laser mampu menghilangkan potensi kerusakan karena tidak adanya kontak gaya antara *cutting tools* dengan material yang diproses. Keunggulan lain yaitu pemotongan yang presisi dan ramah dari polusi suara (Winarbawa, 2017). Namun demikian, pemotongan kayu dengan menggunakan laser CO₂ dapat menyebabkan karbonisasi, pembentukan zona yang terkena panas dan bahkan kerusakan pada permukaan kayu, yang ditemukan disebabkan oleh dekomposisi termal dari struktur kayu setelah laser berinteraksi dengan kayu (Guo *et al.*, 2021).

Penggunaan laser *cutting* telah diterapkan dalam pengerjaan pemotongan bermacam jenis bahan mentah baik logam, kayu, plastik ataupun kain. Seperti yang dilaporkan oleh Slamet *et al.* (2021) pemotongan kain dengan menggunakan laser CO₂ dan pemotongan akrilik menggunakan laser CO₂ telah dilaporkan Nugroho *et al.* (2018) untuk meningkatkan akurasi pemotongan akrilik. Dari berbagai penelitian yang telah dilaporkan menunjukkan bahwa laser CO₂ dapat digunakan sebagai teknologi alternatif untuk pemotongan di berbagai bidang industri.

Penelitian tentang laser CO₂ untuk pemotongan kayu juga sudah banyak dilaporkan diantaranya Guo *et al.* (2021) melaporkan bahwa penggunaan laser CO₂ untuk pemotongan kayu Pinus menunjukkan cacat oleh pemrosesan seperti morfologi dapat diamati pada permukaan garitan; variasi struktur dan kerapatan antara kayu awal dan kayu akhir menghasilkan bentuk yang tidak beraturan; serta efek pemotongan yang lebih baik dapat dicapai dengan kayu berkadar air rendah dan pemotongan searah serat. Selanjutnya Eltawahni *et al.* (2011) melaporkan untuk mengetahui pengaruh parameter pada pemotongan laser CO₂ dari bahan

komposit kayu MDF dengan hasil kombinasi pemotongan yang optimal dapat memberikan hasil kualitas tinggi dan biaya pemotongan yang rendah dan Deshmukh *et al.* (2018) melaporkan bahwa optimasi parameter pemotongan laser CO₂ untuk mengurangi sudut *kerf* (garitan) dan kekasaran permukaan dengan hasil penggunaan daya yang tinggi menghasilkan lebar garitan lebih besar dan interaksi antara daya dan kecepatan potong mempengaruhi kekasaran permukaan.

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai pemotongan laser CO₂ menunjukkan bahwa daya, kecepatan, arah potong dan kadar air pada proses pemotongan sangat mempengaruhi hasil akhir dari permukaan maupun garitan yang dipotong dan kondisi optimal pemotongan (Eltawahni *et al.*, 2011; Deshmukh *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2021). Penggunaan laser CO₂ untuk pemotongan kayu sudah banyak dilaporkan (Rahman, 2022; Amany, 2022). Namun demikian, laporan tentang penggunaan laser CO₂ untuk pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) tidak pernah dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengembangkan informasi mengenai pengaruh perlakuan pemotongan dengan laser CO₂ terhadap kualitas permukaan kayu, sehingga dapat mengetahui pengaruh pemotongan menggunakan laser CO₂ terhadap kayu mangium (*Acacia mangium*) dan mendapatkan hasil pemotongan yang optimal. Maka pada penelitian yang akan dilakukan ini merupakan penelitian pertama tentang pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) dengan menggunakan laser CO₂.

Kayu mangium merupakan salah satu kayu yang memiliki jumlah yang melimpah di Indonesia (Febrianto *et al.*, 2009). Industri kayu di Indonesia memanfaatkan kayu mangium menjadi bahan baku *pulp*, kayu lapis, konstruksi, dan lainnya untuk kemudian diolah menjadi bahan jadi (Febrianto *et al.*, 2017; Jannah *et al.*, 2020). Mangium merupakan salah satu kayu yang mudah didapatkan dan juga termasuk ke dalam golongan tanaman yang memiliki siklus panen yang cepat produksinya. Mangium dapat membantu dalam memperbaiki struktur tanah, mencegah adanya banjir, erosi dan tanah longsor. Sangat cocok di tanam pada daerah yang berbukit dan gunung dan juga cocok di tanam pada kontur dataran rendah (Febrianto *et al.*, 2009; Sittadewi, 2016).

Teknologi alternatif yang dapat dikembangkan untuk mengantisipasi kelangkaan material kayu adalah penggunaan jenis kayu cepat tumbuh, pemilihan

jenis tersebut diharapkan menjadi solusi yang ditawarkan untuk keberlanjutan hutan di Indonesia (Fakhri dan Suprayogi, 2018). Banyaknya jenis mesin pemotong yang dapat digunakan dalam pemotongan kayu khususnya mangium. Akan tetapi dalam pemanfaatannya di lapangan, alat pemotong kayu yang banyak digunakan masih banyak dengan cara manual dan menghasilkan akurasi pemotongan yang kurang baik (Asyakir, 2011).

Kemajuan teknologi pada pengolahan kayu menjadikan kayu mampu dibuat menjadi bermacam-macam jenis produk seperti kertas, tekstil, furnitur dan lain sebagainya (Puspita *et al.*, 2016). Namun produktivitasnya berbanding terbalik dengan kebutuhan yang ada. Kebutuhan bahan-bahan yang berbahan dasar kayu dari tahun ke tahun semakin melonjak, sementara terjadinya krisis bahan baku, produksi industri pengolahan kayu solid semakin menurun (Nurain, 2018). Kayu yang dibutuhkan untuk perindustrian kayu di Indonesia dapat diperkirakan sebanyak 70 juta m³/tahun dengan kenaikan rata-rata sebanyak 14,5%/tahun sementara produksi kayu bulat diperkirakan hanya sebesar 25 juta m³/tahun, dengan demikian terjadi defisit sebesar 45 juta m³/tahun (Rahma dan Purnomo, 2016). Kondisi ini memperlihatkan bahwa hutan alam tidak lagi dapat memenuhi kebutuhan industri kayu di dalam negeri (Pandit *et al.*, 2011).

Dalam mengatasi berbagai masalah, pemerintah membangun HTR dan HTI (Aminah *et al.*, 2013; Siadari *et al.*, 2013). Variasi jenis yang dilakukan pengembangan pada program HTI yang pada umumnya berasal dari variasi jenis kayu yang cepat pertumbuhannya (*fast growing species*), seperti *Acacia mangium*, *Anthocephalus cadamba* dan *Eucalyptus* spp. (Febrianto *et al.*, 2010; Pandit *et al.*, 2011; Prayoga *et al.*, 2020; Sulistio *et al.*, 2020). Mangium merupakan salah satu kayu yang mudah didapatkan dan juga tergolong sebagai tanaman dengan siklus panen yang cepat produksi. Mangium dapat mencegah terjadinya longsor dan banjir dan mampu memperbaiki struktur di dalam tanah. Cocok untuk di tanam di daerah gunung dan berbukit. Namun, pohon mangium juga cocok di tanam pada kontur yang dataran rendah (Sittadewi, 2016). Berdasarkan latar belakang di atas dapat dirumuskan masalah penelitian yaitu:

1. Berapa kedalaman garitan selama pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) menggunakan laser CO₂.
2. Berapa lebar garitan dan lebar berdasarkan kedalaman selama pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) menggunakan laser CO₂.
3. Bagaimana morfologi selama pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) menggunakan laser CO₂.

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut

1. Mengetahui kedalaman garitan selama pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) menggunakan laser CO₂.
2. Mengetahui lebar garitan dan lebar berdasarkan kedalaman selama pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) menggunakan laser CO₂.
3. Mengetahui morfologi selama pemotongan kayu mangium (*Acacia mangium*) menggunakan laser CO₂.

1.3. Kerangka Pemikiran

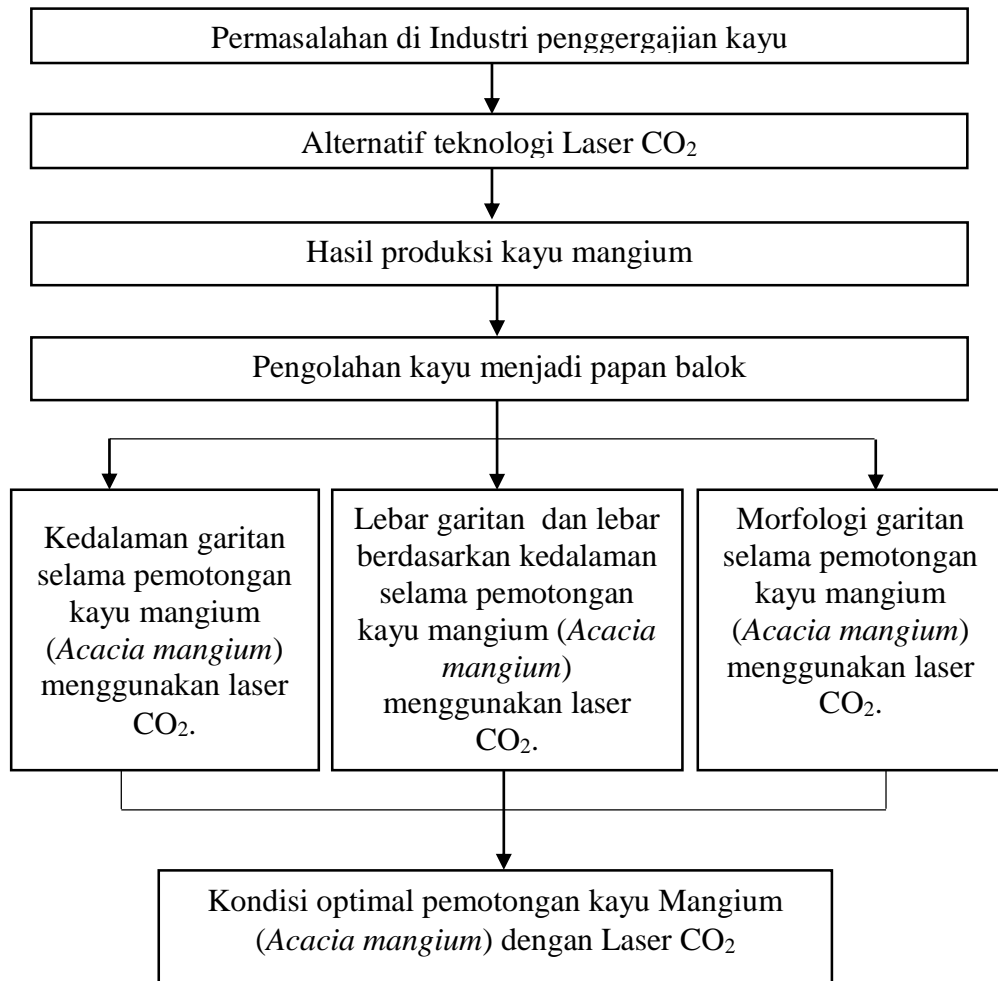
Kegunaan yang dimiliki laser CO₂ antara lain adalah umumnya digunakan sebagai alat pemotong kayu, membuat lubang (*hole piercing*), pengeboran pada kayu (*drilling*), pengukiran kayu, dan pengelasan kayu. Rangkaian pengukiran dan pemotongan kayu dengan memakai laser CO₂ dipengaruhi oleh daya laser, kecepatan nozel, jenis dan tekanan gas yang optimal bagi mesin. Proses dalam setiap parameternya akan mempengaruhi kualitas hasil pemotongan dan pengukiran kayunya (Bram dan Gesang, 2015). Penggunaan mesin laser CO₂ pada pemotongan kayu akan lebih efisien karena lebih akurat dan menghemat waktu.

Penelitian menggunakan laser CO₂ pada pemotongan kayu masih belum banyak dilakukan di Indonesia. Kayu yang digunakan untuk diproduksi lebih lanjut menggunakan laser CO₂ masih minim ditemukan (Azhar, 2014). Salah satunya pemotongan pada kayu mangium (*Acacia mangium*). Padahal kayu mangium (*Acacia mangium*) adalah salah satu kayu yang jumlahnya melimpah di Indonesia (Jannah *et al.*, 2020). Teknologi alternatif yang dapat dikembangkan guna

mengantisipasi kelangkaan material kayu adalah penggunaan jenis kayu cepat tumbuh, pemilihan jenis tersebut diharapkan menjadi solusi yang ditawarkan untuk keberlanjutan hutan di Indonesia (Fakhri dan Suprayogi, 2018; Febrianto *et al.*, 2010; Hidayat *et al.*, 2013).

Penggunaan teknologi laser CO₂ untuk pemotongan mangium (*Acacia mangium*) dapat direkomendasikan dan menjadi solusi untuk masalah yang ada dalam pemotongan kayu saat ini. Dari berbagai keunggulan pemotongan laser CO₂ dalam pengoperasiannya yang fleksibel di berbagai industri teknologi dan manufaktur seperti mempunyai tingkat kecepatan yang tinggi, cepat dalam pengaturannya, rendah dalam hasil limbah dan hasil pengoperasian yang presisi (Panek *et al.*, 2017). Maka akan menjadi solusi yang baik dalam proses pemotongan kayu.

Produksi kayu mangium (*Acacia mangium*) yang mudah dibudidayakan karena jangka waktu panen yang cukup singkat menjadi salah satu faktor untuk menambah nilai ekonominya (Febrianto *et al.*, 2010). Penelitian dilakukan untuk mengetahui hasil dari proses pemotongan laser CO₂ pada kayu mangium (*Acacia mangium*). Hasil dari pemotongan dengan menggunakan perlakuan yang berbeda akan mempengaruhi morfologi, lebar garitan dan kedalaman garitan selama pemotongan. Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Hutan Tanaman Industri

Indonesia dikenal dengan hutan alamnya yang rimbun dan lebat, baik di bagian Indonesia bagian Timur, Indonesia bagian Tengah, dan Indonesia bagian Barat. Setiap daerah memiliki karakteristik dan jenis vegetasi hutannya masing-masing. Selain hutan alam, Indonesia juga dikenal dengan hutan buatan seperti hutan yang digunakan untuk kepentingan industri perkayuan seperti hutan mangium, hutan sengon, hutan alam, dan lainnya (Pasay, 2020). Salah satunya adalah Hutan Tanaman Industri (HTI) yang merupakan kegiatan penting dalam merehabilitasi lahan hutan produktif. Hal ini karena HTI dapat melakukan berbagai fungsi produksi dan lindung (Yama *et al.*, 2014).

Hasil pemantauan tahun 2018 berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) (2020), total luas hutan di Indonesia adalah 120,6 juta hektar, yaitu sekitar 63% dari luas daratan Indonesia. Kawasan Indonesia memiliki tutupan hutan tertinggi di peringkat ketiga setelah Brasil dan Kongo (Global Forest Watch, 2018). Hutan Indonesia juga berperan penting dalam menstabilkan iklim global dengan menyimpan dan menyerap karbon dioksida dari atmosfer (Ambarwati *et al.*, 2019; Banuwa *et al.*, 2019). Sejak 2015 hingga 2020, Indonesia mengalami kehilangan hutan seluas 2,1 juta ha (Luerdi dan Wulandari, 2021).

Dengan semakin berkurangnya potensi kayu hutan alam, ketersediaan jenis kayu komersial dari hutan alam semakin terbatas di pasaran. Di sisi lain, kebutuhan masyarakat akan kayu meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk (Arsad, 2011). Seiring dengan berkurangnya tutupan hutan alam, perlu dikembangkan hutan tanaman sebagai penghasil kayu mentah untuk kebutuhan manusia atau industri (Hidayat *et al.*, 2017). HTI merupakan salah satu program pembangunan

kehutanan prioritas Indonesia yang bertujuan untuk menghasilkan kayu sebagai bahan baku industri (Dariyanto, 1997).

Semakin berkurangnya potensi kayu hutan alam, ketersediaan jenis kayu komersial dari hutan alam semakin terbatas di pasaran. Di sisi lain, kebutuhan masyarakat akan kayu meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk (Arsad, 2011). Sejalan dengan berkurangnya tutupan hutan alam, perlu dikembangkan hutan tanaman sebagai penghasil kayu log untuk kebutuhan industri dan manusia (Hidayat *et al.*, 2017). HTI adalah bentuk dari hasil salah satu program pembangunan kehutanan prioritas Indonesia yang bertujuan untuk menghasilkan kayu sebagai bahan mentah industri (Dariyanto, 1997).

Salah satu jenis kayu yang digunakan untuk membuat HTI adalah kayu Mangium (*Acacia mangium*). Pohon ini tumbuh cepat dan sudah dapat dilakukan pemanenan mulai dari umur 6-7 tahun. Pohon mangium sudah banyak ditanam di berbagai provinsi di Indonesia dan kayunya akan menjadi bahan baku industri menggantikan kayu komersial lainnya di masa depan. Nurwati *et al.* (2007) menganalisis bahwa kayu mangium memiliki karakteristik di wilayah yang berbeda-beda. Wahyu (2008) menunjukkan bahwa faktor alam yang membentuk sifat dan mekanis kayu dapat diklasifikasikan menurut jenis kayu, wilayah tumbuh, umur, letak di dalam batang, diameter, dan lain sebagainya. Mangium adalah salah satu tumbuhan pokok pada HTI yang sampai saat ini belum banyak penelitian dan pengelolaan khusus untuk berbagai kepentingan dalam jasa lingkungan (Hardjana, 2010).

HTI adalah program yang dikembangkan kehutanan Indonesia yang berfungsi untuk memproduksi permintaan kayu yang terus meningkat seiring dengan berkembangnya kayu yang digunakan sebagai bahan baku dalam berbagai industri. Dalam memenuhi bahan baku kehutanan baik kayu maupun bukan kayu, HTI digunakan sebagai kawasan hutan produksi dengan penerapan silvikultur (budidaya hutan) secara intensif. *Acacia mangium* merupakan salah satu komoditas HTI yang paling banyak ditanam (Sari *et al.*, 2020). Mangium adalah salah satu jenis kayu yang diutamakan untuk pengembangan di kawasan Hutan Tanaman Industri karena memiliki berbagai kelebihan seperti pertumbuhan yang cepat. Kemudian dari pertumbuhan yang cepat menghasilkan produksi kayu tinggi, dan

tidak memerlukan persyaratan tumbuh yang tinggi, sehingga diharapkan hasil produksi yang seragam dan kualitas premium (Irianto *et al.*, 2006).

Mangium merupakan spesies tanaman cepat tumbuh yang telah dikembangkan secara ekstensif di bawah program HTI yang ada di Indonesia. Untuk kawasan Asia Pasifik, perkembangan spesies mangium mencapai 4,4 juta ha per tahun (Sari *et al.*, 2020). Spesies kayu mangium memiliki tingkat pertumbuhan yang relatif tinggi, tidak terlalu menuntut kebutuhan lahan yang luas dan mudah untuk disemai (Syafii dan Siregar, 2006). Keberhasilan penanaman jenis tanaman HTI ini tergantung pada beberapa faktor antara lain kondisi dan sifat fisik lahan, teknik silvikultur yang diterapkan, teknik perlindungan tanaman dari gangguan hama, penyakit dan kebakaran hutan serta pengamanan hutan (Suharti dan Widiarti, 2005).

2.2. Gambaran Umum Mangium (*Acacia mangium*)

Acacia Mangium, juga disebut sebagai mangium, adalah salah satu spesies pohon cepat tumbuh yang umumnya digunakan dalam berbagai program pengembangan hutan tanaman di Asia dan Pasifik. Keunggulan pohon jenis ini karena masa tumbuh yang cepat, kualitas kayu yang baik dan toleran terhadap berbagai jenis lingkungan dan tanah (Krisnawati *et al.*, 2011). Indonesia memiliki 9,8 juta ha yang sebagian besar merupakan perkebunan industri. Pohon karet (*Hevea brasiliensis*) merupakan spesies yang paling banyak ditanam, diikuti oleh jati, pinus dan akasia mangium (McKenzie *et al.*, 2004)

Awalnya, spesies mangium ini tumbuh secara alami di hutan hujan Australia bagian timur laut, Papua Nugini dan Maluku, serta Indonesia bagian timur. Di tahun pertengahan 1960-an, setelah diperkenalkan di Malaysia dan Sabah, mangium diperkenalkan ke banyak negara termasuk berbagai wilayah di India, Malaysia, Papua Nugini, Bangladesh, Cina, Indonesia, Filipina, Sri Lanka, Thailand, dan Vietnam. . Jenis mangium ini pertama kali diperkenalkan di Indonesia, khususnya di wilayah Maluku, sebagai jenis pohon untuk program penghijauan pada akhir tahun 1970-an (Prayoga, 2020).

Jenis yang komersial salah satunya adalah mangium. Kayu mangium banyak digunakan sebagai bahan bangunan pembantu. Budidaya mangium untuk

beberapa bentuk pertanian tradisional (Radam, 2011). Mangium sangat diminati di kalangan petani untuk meningkatkan kesuburan tanah di padang rumput atau ladang. Pohon mangium juga dapat tumbuh dengan cepat berdampingan dengan gulma invasif seperti alang-alang (*Imperata cylindrica*). Serta mangium dapat mengatur nitrogen yang ada di atmosfer dan menghasilkan banyak serasah, yang dapat meningkatkan aktivitas biologis tanah dan memulihkan sifat fisik dan kimianya (Krisnawati *et al.*, 2011).

Mangium merupakan tumbuhan asli dari Papua Barat, Papua Nugini dan Maluku (Hamdani *et al.*, 2022). Kayu mangium (*Acacia mangium*) digolongkan sebagai kayu yang memiliki berat yang rendah dengan berat jenis antara 0,45-0,75 g/cm³ dan berada di dalam kayu dengan kelas kuat III-IV dan memiliki golongan kelas awet III. Nilai yang diperoleh pada reduksi kayu mangium dari udara lembab ke udara kering adalah 1,65% pada arah pemotongan radial dan 3,87% pada arah tangensial. Mangium (*Acacia mangium*) di bagian teras lebih gelap dan memiliki warna cokelat atau lebih muda hampir seperti warna kayu jati, tetapi kayu gubal berwarna putih terang dengan sedikit kekuningan dan memiliki serat yang lurus (Noor, 2014).

Menurut Tyas (2020), klasifikasi taksonomi mangium (*Acacia mangium*) ini dapat dilihat dalam klasifikasi di bawah ini:

Kerajaan	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Sub Divisi	: Angiospermae
Kelas	: Dicotyledonae
Ordo	: Rosales
Famili	: Fabaceae
Genus	: <i>Acacia</i>
Species	: <i>Acacia mangium</i>

Pohon mangium sudah banyak ditanam di beberapa provinsi yang di Indonesia dan kedepannya pohon mangium secepatnya dapat menjadi pengganti kayu komersial (Arsad, 2011). Nurwati dan Sinaga (2007) mempelajari sifat

mekanik dan fisik dari kayu mangium yang ada di Jawa Barat dan diyakini bahwa karakteristik yang dimiliki setiap daerah berbeda. Menurut Arsad (2011), berbagai faktor salah satunya faktor alam berpengaruh pada sifat mekanis dan fisik kayu yang terdiri dari, tempat tumbuh, jenis spesies, letak batang, umur, diameter dan lain-lain.

2.3. Sifat Kayu

Nurwati *et al.* (2007) mengungkapkan bahwa kayu terdiri dari dua sifat, yaitu sifat mekanik dan sifat fisik. Sifat fisik kayu meliputi berat jenis, kadar air, penyusutan dan kerapatan. Kemudian sifat mekanik kayu meliputi keteguhan geser, kekuatan lentur, kekuatan Tarik, kekuatan tekan, dan keteguhan belah. Sifat-sifat kayu memiliki peranan penting dalam pemanfaatannya, misalnya pada kerapatan kayu. Kerapatan kayu mempengaruhi sifat higroskopis, kekuatan, penyusutan, kelistrikan, dan sifat akustik, serta sifat-sifat lainnya berkaitan dengan proses atau tahapan selanjutnya dalam pengerjaan kayu (Hidayat *et al.*, 2013). Sifat fisik dan mekanik kayu adalah salah satu nilai yang perlu di perhatikan karena berhubungan dengan peluang pemanfaatannya. Sifat fisik kayu meliputi berat jenis, kadar air, penyusutan dan kerapatan. Sedangkan kekuatan mekanik kayu meliputi kekuatan tekan, kekuatan lentur, keteguhan geser, keteguhan belah, dan kekuatan Tarik (Arsad, 2011).

2.4. Struktur Kayu

Struktur kayu terbagi menjadi dua kelompok berdasarkan jenis kayunya, seperti *hardwood* yang merupakan kayu yang berasal dari pohon yang memiliki daun lebar, berasal dari anggota *Angiospermae*, dan kemudian *softwood* merupakan kayu yang berasal dari pohon daun jarum *Gymnospermae* (Sains *et al.*, 2005). Kayu keras dibagi menjadi trakeid libriform dan serat dan membentuk bersama dengan jaringan dasar kayu keras. Fungsi utama serat adalah untuk memberikan dukungan mekanis ke pohon, meskipun serat di beberapa kayu keras juga berpartisipasi dalam transportasi air. Serat dapat berkontribusi antara 30-75% dari volume jaringan dasar kayu keras. Volume serat tergantung pada spesies kayu. Serat kayu keras lebih kecil

dari serat kayu lunak hal ini disebabkan dinding sel pada kayu keras lebih tebal, lumen dan dinding sel yang berukuran lebih kecil, kemudian perbedaan antara kayu awal dan kayu akhir tidak berbeda jauh seperti yang terlihat pada kayu lunak (Ek *et al.*, 2009).

Kayu keras pada bagian tengah batang memiliki berat jenis kayu yang paling besar dan menurun ke arah luar, kemudian bagian batang terluar memiliki berat jenis kayu yang paling rendah. Hal ini disebabkan oleh dua bagian kayu yang terdapat dalam batang pohon tersebut yaitu kayu teras dan kayu gubal. Bagian tengah batang kayu disebut sebagai kayu teras yang memiliki berat jenis kayu lebih tinggi, kemudian pada bagian luarnya adalah kayu gubal yang memiliki berat jenis kayu lebih rendah (Susanto *et al.*, 2013). Kayu awal dan kayu akhir memiliki perbedaan warna yang dapat kita lihat pada lingkaran tumbuhan, hal ini disebabkan adanya perbedaan pada warna jari-jari kayu (Fajriani, 2022).

2.5. Garitan (*Kerf*)

Kerf width (lebar garitan) dapat dijadikan sebagai penentuan kualitas potong yang dilihat pada hasil potong. *Kerf width* adalah lebar celah ataupun garitan yang disebabkan radiasi sinar laser *cutting*, mengakibatkan besarnya suhu secara eksoterm. Hal ini mengakibatkan proses penyubliman di area potong pada media yang menghasilkan jalur pemotongan (Iksan, 2022).

Area *kerf width* menjadi area yang memiliki peran paling penting dalam potongan, keberhasilan potongan dapat diukur melalui hasil dari struktur geometri. Hasil potong dapat dikatakan semakin baik apabila semakin kecil ukuran *kerf width* yang dihasilkan. Tingkat keberhasilan pada proses pemotongan *kerf width* dapat dilihat dari objek yang terpotong, dan menunjukkan lebar potongan pada area pola yang menjadi jalur sinar pada radiasi laser *cutting* (Gadallah dan Abdu, 2015).

2.6. Laser

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) merupakan sebuah alat yang mekanismenya dilakukan dengan menggunakan cara memancarkan radiasi elektromagnetik dalam bentuk cahaya namun tidak dapat oleh

mata normal secara langsung dengan cara pancaran terstimulasi. Pancaran ini merupakan pancaran tunggal dengan memancarkan foton dalam pancaran koheren. Prinsip kerjanya dengan menggunakan energi panas yang berasal dari sinar laser lalu mencairkan dan menguapkan material yang akan dilakukan pemotongan (Luthfi *et al.*, 2021; Sulistri, 2013).

Penggunaan laser memiliki keunggulan pada proses produksi karena pengerjaannya akan berjalan dengan cepat, hal ini disebabkan mesin laser dapat menerima data langsung atau perintah dari komputer (Samarya, 2015), keunggulan lainnya mampu melakukan pemotongan pada benda-benda rumit, mampu menghasilkan berbagai grafir yang diinginkan, dan mampu memberikan dampak pada material hasil pemotongan yang lebih optimal (Arifin, 2018). Selain itu, keunggulan lainnya pada laser yaitu dapat diterapkan di berbagai jenis material misalnya pada seperti kayu, pelat, akrilik, kaca dan kertas karton (Nugroho *et al.*, 2018).

2.7. Jenis-Jenis Laser

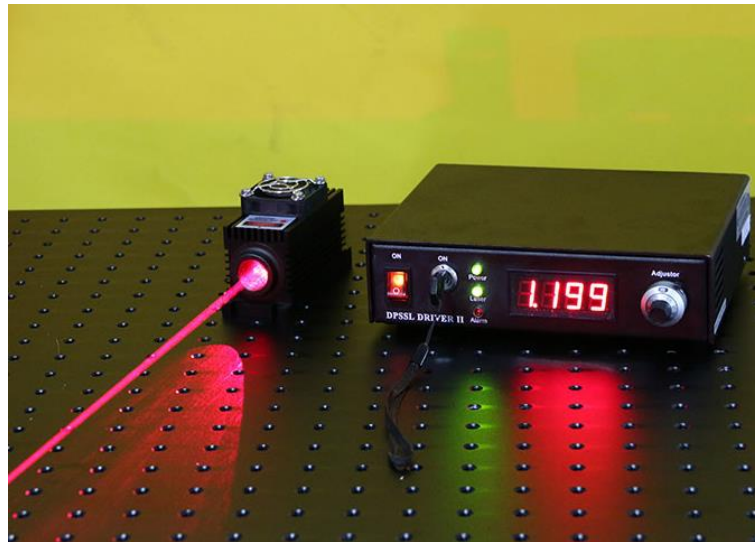
Laser *engraving* atau laser *cutting* sebagai solusi untuk memudahkan pembuatan dalam suatu pengerjaan misalnya *casing* yang menggunakan bahan akrilik atau mika. Laser *cutting* merupakan salah satu teknologi yang memanfaatkan laser dalam pengerjaannya untuk memotong material dan umumnya diterapkan pada industri manufaktur. Cara kerja laser *cutting* dengan memfokuskan laser bertekanan tinggi untuk menggores atau memotong material, dan dibantu dengan penggunaan komputer untuk memberikan perintah. Secara umum sinar laser memiliki bentuk cahaya yang tidak dapat dilihat menggunakan mata normal. Laser *cutting* pemanfaatannya pada industri sudah diatur untuk memfokuskan jumlah energi yang tinggi berpindah ke tempat yang lebih kecil. Sinar laser *cutting* umumnya memiliki besaran diameter berkisar 0,003-0,006 inci pada saat menggunakan laser dengan panjang gelombang yang pendek (Saputro dan Darwis, 2020).

Sinar laser mempunyai karakteristik tersendiri sehingga memiliki perbedaan dari yang lainnya. Sifat unik yang dimiliki sinar laser setiap laser memiliki karakteristik tersendiri, mulai dari memiliki profil sinar yang berbeda ,

panjang gelombang, dan keluaran yang berbeda, tiap-tiap sinar mempunyai kelebihan dan kekurangannya tersendiri (Manurung, 2013).

2.7.1. Laser *Diode-Pumped Solid State* (DPSS)

Laser *Diode-Pumped Solid State* (DPSS) merupakan sebuah laser memiliki bentuk paling dasar yang tersusun dari sebuah penguat elemen yang terdapat dalam sebuah resonator optik. Laser DPSS menggunakan bahan mediumnya berasal dari padatan (*solid state*). Penguat elemen pada laser DPSS harus distimulasi terlebih dahulu untuk menghasilkan pancaran laser. Stimulasi ini dapat dihasilkan melalui proses pelepasan elektrik dari plasma yang dipakai laser ion argon atau menggunakan radiasi optik, seperti proses pada cahaya lampu (Manurung, 2013).



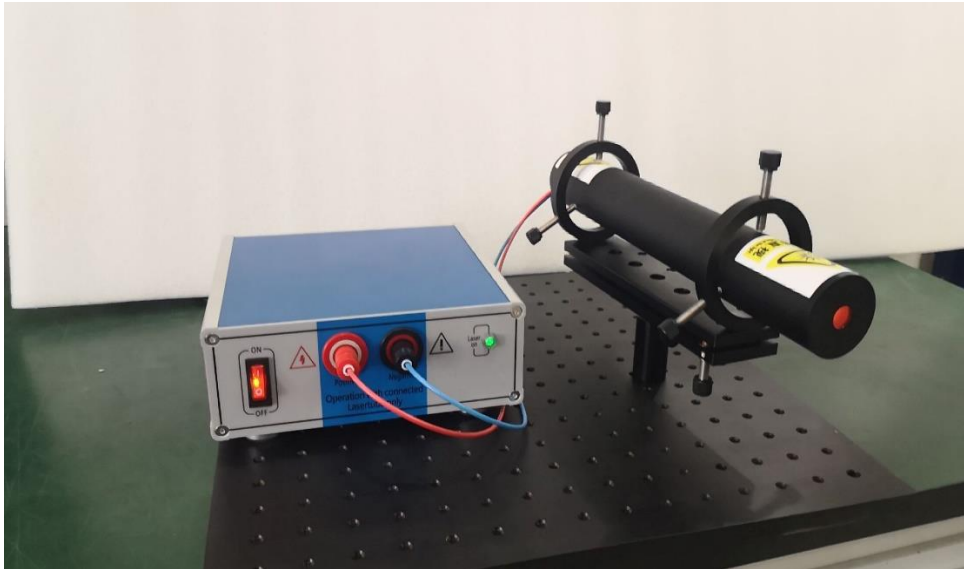
(Sumber: civillaser.com)

Gambar 1. Laser *Diode-Pumped Solid State* (DPSS).

2.7.2. Laser *Helium Neon* (He-Ne)

Laser *Helium Neon* (*He-Ne*) merupakan menjadi laser gas yang paling ekonomis, dan mudah untuk diperoleh di pasaran. Laser jenis ini umumnya digunakan untuk bekerja dengan panjang gelombang 632,8 μm memiliki cahaya berwarna merah, ada berbagai jenis laser He-Ne dengan berbagai bentuk panjang gelombang misalnya laser He-Ne dengan panjang gelombang 611,9 μm (jingga) 594,1 μm (kuning) 543,5 μm (hijau), dan lainnya. Umumnya penggunaan laser *He-Ne* banyak dijumpai pada spektroskopi, holografi, perawatan medis, meteorologi,

barcode scanning dan lain sebagainya. Laser *He-Ne* adalah salah satu laser yang menggunakan bahan medium yang berasal dari gas, gas tersebut berupa gas helium dan gas neon menggunakan rasio gas 10:1 (Manurung, 2013).



(Sumber: Alibaba.com)

Gambar 2. Laser *Helium Neon (He-Ne)*.

2.7.3. Laser CO₂

Salah satu laser yang memiliki energi tinggi dan salah satu laser yang paling efisien adalah Laser CO₂. Laser dapat memisahkan molekul CO₂ pada panjang gelombang 10,6 μm dalam rentang inframerah. Transisi penting terjadi antara tingkat energi vibrasi yang ada di molekul CO₂. Laser CO₂ adalah laser kontinu, pulsa atau Q-switched. Dengan hanya menggunakan daya watt kecil, laser CO₂ yang dapat memancarkan sepersekian watt sinar laser dan dapat memotong beberapa material. Laser CO₂ sekarang banyak digunakan dalam proses pemotongan logam, pengelasan logam serta bahan menenun. Contoh laser yang medianya diperoleh dari gas adalah laser CO₂. laser CO₂. Dengan panjang gelombang sekitar 10,6 μm , sinar laser CO₂ ini dapat menyerap zat tertentu dan dengan mudah mengubahnya menjadi panas (Ismail, 2012).



Gambar 3. Mesin Laser CO₂.

2.8. Bagian-Bagian Laser CO₂

Berdasarkan hasil penelitian Ogana (2018), laser terdiri dari bagian-bagian yang dapat membentuk sinar, antara lain:

1. Medium laser merupakan suatu zat berupa ion, molekul, atau atom yang dilapisi energi yang kemudian sinar laser terpancarkan. Medium laser CO₂ terdiri dari campuran gas N₂, CO₂ dan He. Gas N₂ diperlukan untuk menghasilkan energi atom CO₂, gas CO₂ berfungsi sebagai medium laser aktif, kemudian untuk menghilangkan panas atau dingin dengan cara dikeluarkan menggunakan gas He. Sistem pompa terdiri dari sumber energi sinar laser. Frekuensi tinggi sekitar 13,56 MHz digunakan untuk mendorong atom ke energi yang lebih tinggi.
2. Lokasi dibentuknya sinar laser ada pada resonator. Resonator pada laser ditempatkan diantara dua cermin, yaitu *rear mirror* (cermin dalam) dan *output mirror* (cermin luar). Dari kedua susunan cermin akan mampu untuk mengarahkan dengan pasti sinar gelombang yang akan dipancarkan kearah yang sesuai. *Rear mirror* berfungsi untuk memantulkan sinar laser, Kemudian pada *output mirror*, dari 40-50% sinar laser yang dibentuk lalu dipancarkan keluar resonator.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Kegiatan dalam penelitian ini dilaksanakan dalam tiga tempat, pertama dilakukan persiapan bahan yang dilakukan di *Workshop* THH (Teknologi Hasil Hutan), Jurusan Kehutanan, Universitas Lampung. Pemotongan kemudian dilakukan dengan menggunakan laser CO₂ di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Analisis mikroskopis dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik di Laboratorium Ilmu Hama dan Tumbuhan Jurusan Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Keputusan lokasi penelitian diputuskan dengan mempertimbangkan bahwa lokasi tersebut telah disediakan alat yang diperlukan untuk penelitian ini. Penelitian dilakukan pada Januari 2023.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin laser CO₂ 50 watt, mikroskop stereo, *software statistic*, kamera dan oven. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kayu mangium (*Acacia mangium*) yang telah dibentuk papan, dengan dimensi panjang x lebar x tebal (15 cm x 15 cm x 1 cm).

3.3. Rancangan Penelitian

Penelitian ini didesain dalam Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial. Terdapat tiga faktor yang digunakan adalah kadar air terdiri atas dua taraf yaitu kering udara (B1) dan kering oven (B2). Faktor selanjutnya adalah kecepatan pemotongan yang terdiri atas empat taraf yaitu 3 mm/s (K1), 5 mm/s (K2), 7 mm/s (K3), 9 mm/s (K4). Perlakuan ketiga adalah arah pemotongan terdiri dari

dua taraf yaitu sejajar (V1) dan tegak lurus (V2). Jumlah kombinasi dari ketiga faktor tersebut adalah $2 \times 4 \times 2 = 16$ yaitu B1K1V1, B1K2V1, B1K3V1, B1K4V1, B2K1V1, B2K2V1, B2K3V1, B2K4V1, B1K1V2, B1K2V2, B1K3V2, B1K4V2, B2K1V2, B2K2V2, B2K3V2, B2K4V2. Jika setiap unit kombinasi dilakukan pengulangan 3 kali, dan maka total unit yang akan dilakukan percobaan adalah $4 \times 2 \times 2 \times 3 = 48$.

3.4. Parameter Penelitian

Metode secara eksperimen dengan skala laboratorium digunakan dalam penelitian ini. Penelitian ini mengukur parameter kedalaman garitan, lebar garitan dan morfologi garitan. Pengukuran kedalaman garitan dan lebar garitan dilakukan menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 8x. Untuk meminimalkan kesalahan eksperimental, rata-rata tiga kali pengukuran dicatat sebagai nilai kedalaman garitan dan lebar garitan di setiap putaran. Bentuk garitan dan morfologi garitan dikarakterisasi dengan mikroskop stereo. Perlakuan pemrosesan eksperimen yaitu kecepatan potong, arah pemotongan dan kadar air, yang telah dilaporkan sebagai perlakuan signifikan dalam literatur. Untuk arah pemotongan, percobaan pemotongan laser dilakukan secara sejajar dan tegak lurus terhadap arah serat. Dan pengujian sampel selanjutnya diukur kadar air. Pengujian kadar air basah menggunakan standar Indonesia sebesar 12%-20%. Pada kadar air kering oven dilakukan pengovenan $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam.

3.5. Prosedur Penelitian

3.5.1. Persiapan Alat

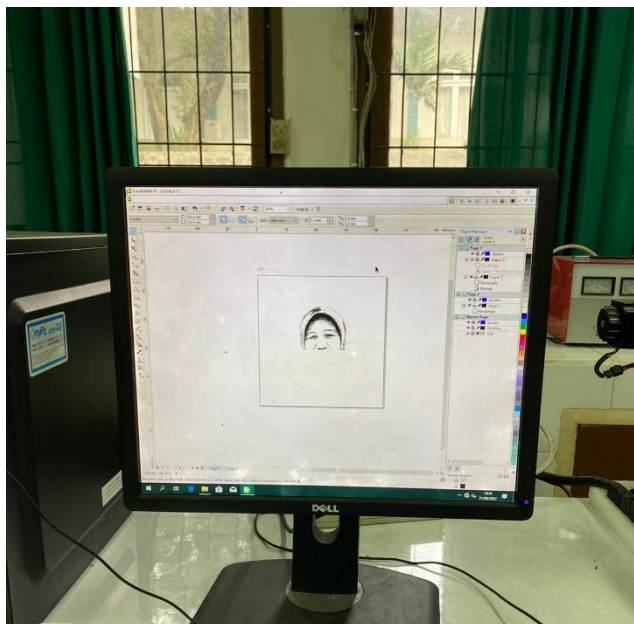
Mesin laser CO₂ (LS6040 50W, *Glorystar*, Shenzen, China) di persiapkan dan diatur yang terdiri dari pipa asap, kipas asap, pompa air, kabel daya, kabel *ground*, kabel *port* paralel, kabel *USB* yang dipasangkan ke mesin laser. Pipa asap dan kipas asap digunakan sebagai pengatur sirkulasi keluar masuknya udara kedalam mesin. Pompa digunakan sebagai pendingin mesin laser dengan cara air dialirkan masuk dan keluar kedalam mesin laser. Mesin laser dihubungkan dengan sumber tegangan menggunakan kabel daya. Kabel *gorund* digunakan mesin laser

sebagai sistem *grounding* yang kemudian dihubungkan dengan *ground*. Gambar 5 merupakan mesin laser CO₂ yang akan digunakan dalam pemotongan. Kabel *port* paralel berfungsi sebagai pengendali mesin laser melalui *software* dengan menghubungkan komputer dengan mesin laser (Rahman, 2022).

Corel Draw Laser DRW versi X7 digunakan sebagai *software* dalam penelitian (Gambar 6). *Corel Draw Laser* umum digunakan sebagai *software* untuk mendesain pemotongan di mesin laser. *Corel Draw Laser* akan mendesain pemotongan dan dapat mengatur tingkat kecepatan pemotongan. Beberapa ekstensi file dapat dibuka dengan menggunakan *Software* ini. Pada saat penggunaan *software* harus dicermati dalam pemilihan *Device ID. Cutting machine properties*, digunakan pada pemilihan *Device ID*. Setelah penginstalan *hardware* dan *software* selesai, pastikan komputer terhubung dengan mesin laser agar mesin laser dapat dioperasikan (Rahman, 2022).



Gambar 4. Bagian Mesin Laser CO₂.



Gambar 5. *Software Corel Draw Laser.*

3.5.2. Persiapan Bahan

Sampel kayu mangium yang digunakan berukuran panjang x lebar x tebal (15 cm × 15 cm × 1 cm). Sampel kayu mangium merupakan satu pohon yang sama, dan dari satu potongan log sama kemudian dipotong sehingga menghasilkan papan dengan permukaan yang memiliki bagian muka sehingga menghasilkan papan di bidang radial . Sampel kayu mangium didapatkan dari pohon yang berusia tujuh tahun dan berasal dari daerah Provinsi Lampung. Sortimen log yang diambil sebagai sampel adalah bagian pangkal pohon dengan potongan panjang 1,3 meter. Sampel dipilih untuk mendapatkan kayu yang bermutu baik, terhindar dari cacat dan retakan yang mempengaruhi mutu kayu. Potongan sampel dari log tanpa perlakuan pengeringan adalah sampel dengan kadar air basah. Sampel dengan kadar air kering oven didapatkan dengan cara mengoven sampel kadar air basah dengan suhu diatur ke 100°C ± 5°C dengan durasi 24 jam. Pengukuran kadar air diukur dengan menggunakan rumus :

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

Keterangan :

KA = kadar air (%)

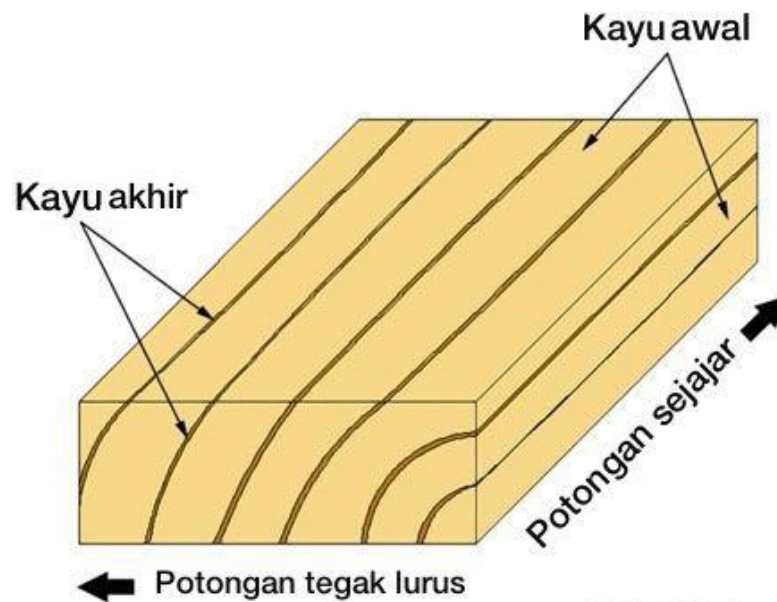
BA = berat awal sampel kayu (g)

BK = berat kering oven (g)

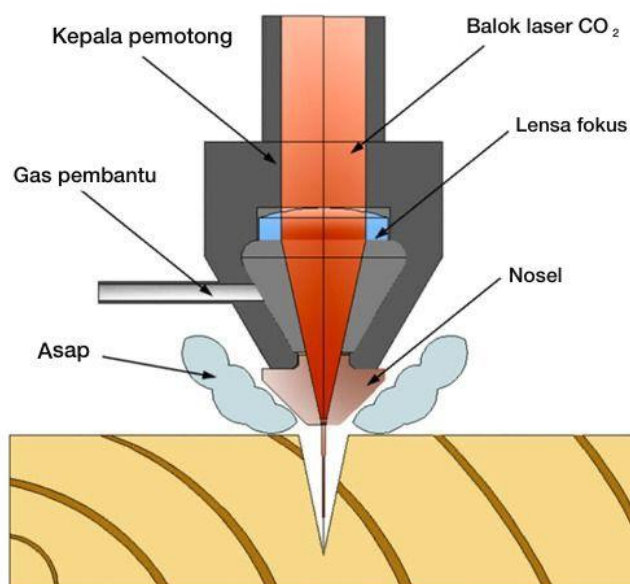
3.5.3. Pelaseran Papan Kayu Mangium (*Acacia mangium*)

Papan kayu mangium yang telah disediakan kemudian diampelas permukaannya agar mendapatkan kekasaran permukaan kayu yang sama. Gelombang kontinu 50 W mesin pemotong laser CO₂ dengan panjang gelombang 10,63 m dan lensa pemfokusan dengan panjang fokus 63,5 mm digunakan dalam eksperimen pemotongan laser. Diameter ukuran titik laser yang digunakan selama pemotongan adalah 0,1 mm. Untuk menghilangkan debu karbon dan asap dari area pemotongan, udara terkompresi adalah disuplai oleh nosel jet gas koaksial dengan tekanan 0,4 bar. Sampel ditempatkan ke bangku stasioner, dan pergerakan kepala pemotong dikendalikan pada sumbu x dan y oleh komputer. Sebelum pemotongan dilakukan, titik laser difokuskan ke permukaan sampel dengan menyesuaikan geseran alat pengangkat untuk mengubah jarak kebuntuan nosel sampai akurat. Jarak kebuntuan nosel diatur menjadi 10 mm seperti yang terlihat pada Gambar 8.

Perlakuan pemrosesan eksperimental adalah kecepatan potong, arah pemotongan dan kadar air sebagai perlakuan penelitian. Untuk menentukan kisaran variasi kecepatan potong, serangkaian percobaan pemotongan laser pendahuluan dilakukan. Kecepatan potong divariasikan dari 3 mm/s hingga 9 mm/s. Untuk arah pemotongan, percobaan pemotongan laser dilakukan secara sejajar dan tegak lurus terhadap arah serat. Kadar air dibagi menjadi kering dan basah. Diagram skematis dari arah pemotongan laser ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 6. Skema dari arah pemotongan Laser CO₂ (Guo *et al.*, 2021).



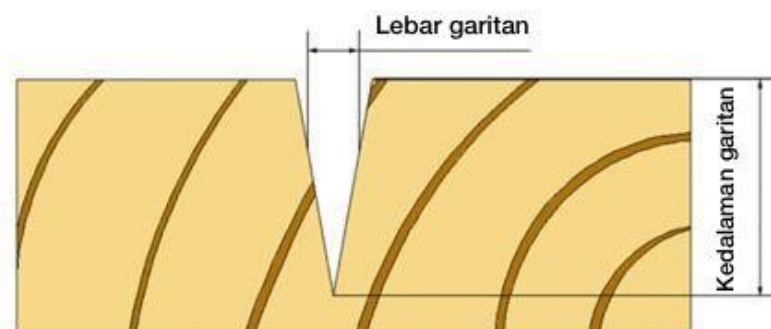
Gambar 7. Skema pemotongan laser (Guo *et al.*, 2021).

3.6. Pengujian Hasil Cutting Dengan Mikroskop

3.6.1. Kedalaman dan Lebar Garitan

Pengukuran kedalaman garitan dan lebar garitan dilakukan di bawah mikroskop stereo dengan perbesaran 8x. Untuk meminimalkan kesalahan eksperimental, rata-rata tiga pengukuran dicatat sebagai nilai kedalaman garitan

dan lebar garitan di setiap putaran. Metode yang digunakan untuk mengukur dimensi kedalaman garitan dan lebar garitan digambarkan dalam Gambar 9.



Gambar 8. Metode yang digunakan untuk mengukur dimensi kedalaman garitan dan lebar garitan menggunakan mikroskop stereo. (Guo *et al.*, 2021).

3.6.2. Morfologi Garitan

Morfologi garitan dilakukan dengan mikroskop stereo. Bentuk garitan dan morfologi garitan akan dipengaruhi dari berbagai perlakuan yang digunakan. Perlakuan yang digunakan yaitu antara lain pengaruh kadar air, arah pemotongan dan pengaruh dari kecepatan potong.

3.7. Analisis Data

3.7.1. Uji Homogenitas

Uji statistik dilakukan setelah data mikroskop telah selesai di ambil. Tahapan uji statistik dalam menganalisis data antara lain uji homogenitas, analisis varian dan uji beda nilai tengah perlakuan. Uji homogenitas adalah teknik analisis untuk memverifikasi apakah data berasal dari populasi yang homogen atau tidak homogen. Uji homogenitas varian tiga atau lebih kelompok sampel menggunakan uji Bartlett. Untuk menentukan sampel homogen atau tidak maka dilakukan perbandingan dengan kriteria sebagai berikut :

$$X^2 \text{ hitung} > X^2 \text{ tabel}$$

Artinya kelompok sampel memiliki varians yang tidak homogen dan tidak bisa dilakukan analisis varian

$$X^2 \text{ hitung} < X^2 \text{ tabel}$$

Artinya kelompok sampel memiliki varians yang homogen dan bisa dilakukan analisis varian.

3.7.2. Analisis Varian (ANOVA)

Tahap kedua dilakukan Analisis Varian (ANOVA) digunakan untuk rancangan acak lengkap tiga faktor. Tiga faktor perlakuan diberikan pada setiap unit percobaan, dicontohkan faktor pertama adalah faktor B dengan taraf sebanyak i , faktor kedua adalah faktor K dengan taraf sebanyak j , dan faktor ketiga adalah faktor V dengan taraf sebanyak k . Kemudian, kombinasi dari ketiga faktor perlakuan tersebut dikenakan pada n independen subjek dalam setiap kombinasi perlakuan, maka layout desain dari rancangan ini disajikan dalam tabel berikut ini:

Tabel 1. *Layout* rancangan acak lengkap tiga faktor

		V1	V2	...	V _k
B1	K1	X ₁₁₁	X ₁₁₂	...	X _{11k}
	K2	X ₁₂₁	X ₁₂₂	...	X _{12k}

	K _j	X _{1j1}	X _{1j2}	...	X _{1jk}
B2	K1	X ₂₁₁	X ₂₁₂	...	X _{21k}
	K2	X ₂₂₁	X ₂₂₂	...	X _{22k}

	K _j	X _{2j1}	X _{2j2}	...	X _{2jk}
...
B _i	K1	X _{i11}	X _{i12}	...	X _{i1k}
	K2	X _{i21}	X _{i22}	...	X _{i2k}

	K _j	X _{ij1}	X _{ij2}	...	X _{ijk}

Rumus linear rancangan acak lengkap tiga faktor sebagai berikut :

$$X_{npqr} = \mu + \alpha_p + \beta_q + (\alpha\beta)_{pq} + \gamma_r + (\alpha\gamma)_{pr} + (\beta\gamma)_{qr} + (\alpha\beta\gamma)_{pqr} + e_{npqr}$$

dengan :

$$p = 1, 2, \dots, i$$

$$q = 1, 2, \dots, j$$

$$r = 1, 2, \dots, k$$

$n = 1, 2, \dots, l$

X_{npqr} = observasi/pengamatan pada satuan percobaan ke n dari kombinasi perlakuan

pqr dengan faktor A taraf ke p , faktor B taraf ke q , dan faktor C taraf ke r

μ = rata-rata umum

α_p = pengaruh faktor A pada taraf ke p

β_q = pengaruh faktor B pada taraf ke q

γ_r = pengaruh faktor C pada taraf ke r

$(\alpha\beta)_{pq}$ = pengaruh interaksi faktor A taraf ke p dan faktor B taraf ke q

$(\alpha\gamma)_{pr}$ = pengaruh interaksi faktor A taraf ke p dan faktor C taraf ke r

$(\beta\gamma)_{qr}$ = pengaruh interaksi faktor B taraf ke q dan faktor C taraf ke r

$(\alpha\beta\gamma)_{pqr}$ = pengaruh interaksi faktor A taraf ke p , faktor B taraf ke q , dan faktor C taraf ke r

e_{npqr} = pengaruh eror/galat yang muncul dari kombinasi percobaan ke n dalam faktor A taraf ke p , faktor B taraf ke q , dan faktor C taraf ke r

3.7.3. Uji Beda Nilai Tengah Perlakuan

Pada tahap ketiga dilakukan uji *Duncan* sebagai uji perbandingan dari beda ragam perlakuan. Dengan rumus :

$$D = d \alpha. p. v \frac{\sqrt{KTG}}{n}$$

Dengan :

p = jarak peringkat dua perlakuan

v = derajat bebas galat

α = taraf nyata

V. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Perlakuan kecepatan, kadar air dan arah potong cenderung mempengaruhi kedalaman garitan yang dihasilkan pada pemotongan kayu mangium dengan laser CO₂. Semakin rendah kecepatan pemotongan maka garitan yang dihasilkan akan lebih dalam. Hal ini disebabkan karena semakin kecil kecepatan proses pemotongan, maka energi yang diberikan pada satu titik akan semakin besar. Kayu kering udara menghasilkan garitan yang lebih dalam dibandingkan kayu kering oven. Hal ini disebabkan karena perubahan kerapatan antara kayu kering udara dan kering oven yang tidak berbeda nyata menyebabkan kedalaman lebih dangkal pada kayu kering oven. Pemotongan sejajar arah serat menghasilkan garitan yang lebih dalam dibandingkan pemotongan tegak lurus arah serat. Perbedaan kedalaman tersebut disebabkan karena kayu memiliki kekuatan lebih besar saat menerima gaya tegak lurus dengan serat kayu dan lemah saat menerima gaya sejajar arah serat kayu.
2. Perlakuan kecepatan, kadar air dan arah potong cenderung mempengaruhi lebar garitan yang dihasilkan pada pemotongan kayu mangium dengan laser CO₂. Semakin tinggi kecepatan pemotongan maka garitan yang dihasilkan lebih sempit. Hal ini disebabkan karena waktu pemotongan yang semakin cepat maka akan semakin singkat kontak antara *nozzle* dengan kayu. Kayu kering oven menghasilkan lebar garitan yang lebih lebar dibandingkan kayu kering udara. Hal ini disebabkan karena kayu yang memiliki kadar air lebih tinggi, membutuhkan energi untuk menguapkan air terlebih dahulu sebelum menghasilkan garitan. Pemotongan sejajar arah serat menghasilkan garitan yang lebih besar dibandingkan pemotongan tegak lurus arah serat. Hal ini disebabkan karena panas memotong lebih cepat disepanjang serat sehingga menghasilkan

garitan yang lebih lebar saat memotong sejajar terhadap serat. Perlakuan kecepatan, kadar air dan arah potong cenderung mempengaruhi lebar berdasarkan kedalaman. Semakin tinggi kecepatan pemotongan maka yang dihasilkan lebih kecil. Hal ini disebabkan karena semakin singkat waktu sinar laser mengenai kayu maka garitan yang dihasilkan dari pemotongan akan semakin menyempit. Kayu kering oven menghasilkan garitan yang lebih besar dibandingkan kayu kering udara. Hal ini disebabkan karena kayu yang memiliki kadar air lebih tinggi, membutuhkan energi untuk menghasilkan garitan yang lebih lebar. Oleh karena itu, kayu kering oven memiliki garitan yang lebih besar. Pemotongan sejajar arah serat menghasilkan garitan yang lebih besar dibandingkan pemotongan tegak lurus arah serat. Hal ini disebabkan karena lebih banyak kayu akhir hadir pada pemotongan tegak lurus arah serat.

3. Pemotongan menggunakan laser menghasilkan garitan berbentuk “V”. Bentuk “V” yang bergelombang terjadi karena garitan yang tidak beraturan melewati kayu awal dan kayu akhir. Hal ini disebabkan karena kayu awal memiliki dinding sel yang lebih tipis dibandingkan kayu akhir. Sehingga dengan energi yang sama, garitan yang dihasilkan garitan lebih lebar pada sel-sel yang dindingnya tipis.

DAFTAR PUSTAKA

- Amany, R. 2022. *Pengaruh Daya Laser CO₂ terhadap Perubahan Warna dan Kekasaran Permukaan Papan Partikel dan MDF*. Skripsi. Universitas Lampung.
- Arifin, Z. 2018. *Pengaruh Variasi Cutting Speed terhadap Kekasaran Permukaan SUS 304 pada Proses Laser Cutting Menggunakan Gas N₂*. Doctoral dissertation. Universitas Brawijaya.
- Arsad, E. 2011. Sifat fisik dan kekuatan mekanik kayu akasia mangium (*Acacia mangium willd*) dari hutan tanaman industri Kalimantan Selatan. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 3(1):20-23.
- Asyakir, K. 2011. *Penggunaan PLC untuk Mesin Pemotong Dengan Pengaturan Ketebalan Kayu*. Skripsi. Yogyakarta.
- Azhar, M.C. 2014. *Analisa Kekasaran Permukaan Benda Kerja dengan Variasi Jenis Material dan Pahat Potong*. Skripsi. Universitas Bengkulu.
- Bram, D., dan Gesang, S. 2015. Pengaruh kecepatan potong pada pemotongan polymethyl methacrylate menggunakan mesin laser cutting. *Seminar Nasional Teknologi 2015*. Institut Teknologi Nasional Malang. Malang.
- BSN. 2017. SNI Kadar Air Kayu Komersial.
https://www.bsn.go.id/main/bsn/isi_bsn/20004/sni.
- BSN. 2017. SNI Kerapatan Kayu.
https://www.bsn.go.id/main/bsn/isi_bsn/20004/sni.
- Coto, Z. 2005. Penurunan Kadar Air Keseimbangan dan Peningkatan Stabilitas Dimensi Kayu dengan Pemanasan dan Pengekangan Reducing Equilibrium Moisture Content and Improving Dimensional Stability of Wood through Heating and Restraining. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 3(1):27-31.
- Dariyanto, A. 1997. *Studi Prestasi Kerja dan Biaya Pemeliharaan Tanaman Hutan Tanaman Industri (Studi Kasus di PT. Perawang Sukses Perkasa Industri, Riau)*. Doctoral dissertation. Universitas Gadjah Mada.

- Deshmukh., Himanshu, H., Nitin, G., and Phafat. 2018. Optimization of machining parameters in CW CO₂ laser cutting for reduced kerf angle and surface roughness. *Journal of Industrial Mechanics*. 3(3).
- Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G. (Eds.). 2009. *Wood chemistry and biotechnology*. 1(1).
- Eltawahni, A. G., Olabi and Benyounis, K. Y. 2011. Investigating the CO₂ laser cutting parameters of MDF wood composite material. *Optics and laser technology*. 43(3):648-659.
- Fajriani, E. 2022. *Mengenal Kayu Kalo Belum Kenal, Yuk Kenalan*. Book. Deepublish.
- Fakhri, I., Suprayogi, T.A., Prayitno., dan Ronald, M.H. 2017. Potensi kayu jenis cepat tumbuh (fast growing species) sebagai material alternatif komponen kapal kayu yang berkelanjutan. *Prosiding Seminar Nasional Pelestarian Lingkungan*. 396-407.
- Forlius, V.A, Diba, F., dan Sisillia, L. 2017. Dampak pengasapan kayu terhadap sifat fisik kayu akasia (*Acacia mangium Willd*) dan kayu laban (*Vitex pubescens Vahl*). *Jurnal Hutan Lestari*. 5(2).
- Gadallah, M. H., and Abdu, H.M. 2015. Modeling and optimization of laser cutting operations. *Manufacturing Rev*. 2(1):1-15.
- Ginoga, B. 1997. Beberapa sifat kayu mangium (*Acacia mangium Willd.*) pada beberapa tingkat umur. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 15(2):132-149.
- Guo, X., Deng, M., Hu, Y., Wang, Y., and Ye, T. 2021. Morphology, mechanism and kerf variation during CO₂ laser cutting pine wood. *Journal of Manufacturing Processes*. 68(1):13-22.
- Halim, G, Asroni, A, dan Budiyanto, E. 2022. Analisa kerja mesin CNC laser cutting CO₂ 2 axis berbasis MACH3 pada variasi pemotongan. *ARMATUR: Artikel Teknik Mesin dan Manufaktur*. 3(1):28-36.
- Hamdani, M.F., Achmad, B. dan Peran, S.B. 2022. Model arsitektur pohon di arboretum Fakultas Kehutanan Universitas Lambung Mangkurat. *Jurnal Sylva Scientiae*. 5(3):480-492.
- Hardjana, A. K. 2010. Potensi biomassa dan karbon pada hutan tanaman *Acacia mangium* di HTI PT. Surya Hutani Jaya, Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 7(4): 237-249.

- Hernandez-Castaneda, J. C., Sezer, H. K., & Li, L. 2011. The effect of moisture content in fibre laser cutting of pine wood. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(9-10):1139-1152.
- Hidayat, M. A., Farid, A., dan Suwandono, P. 2021. Analisa parameter pada pemotongan plate menggunakan CNC fiber laser cutting terhadap kekasaran permukaan. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*. 10(2).
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J. H., Febrianto, F., Lee, S.H., Chae, H. M., Kondo, T., and Kim, N. H. 2017. Carbonization characteristics of juvenile woods from some tropical trees planted in Indonesia. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*. 62(1):145-152.
- Hidayat, W., Sya'bani, M.I., Purwawangsa, H., Iswanto, A.H., and Febrianto, F. 2011. Effect of wood species and layer structure on physical and mechanical properties of strand board. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kayu Tropis*. 9(2):134-140.
- Ibrahim, M., and Kesevaan, M. 2018. Parameter optimization for CO₂ laser cutting of wood polymer composite (WPC). *Journal of Physics: Conference Series*. 1049(1).
- Ikhsan, M. 2022. Analisis Parameter Pemotongan Material Kain Tekstil Menggunakan Mesin Cnc Laser Cutting Tiga Axis Kapasitas Daya 5,5 Watt. *Tesis*. Universitas Hasanuddin.
- Irianto, R.S.B., Barry, K., Hidayati, N., Ito, S., Fiani, A., Rimbawanto, A., and 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*. Skripsi. Universitas Indonesia. Depok. 116p.
- Iswanto, A.H. 2008. Sifat fisik kayu, berat jenis dan kadar air pada beberapa jenis kayu. *Skripsi*. Universitas Sumatera Utara.
- Jannah, M., Arryati, H., dan Satriadi, T. 2020. Analisis sifat fisik asap cair kayu akasia daun kecil (*Acacia Auriculiformis*) berdasarkan masa simpan. *Jurnal Sylva Scientiae*. 3(5):899-905.
- Kubovský, I., Krišťák, L., Suja, J., Gajtanska, M., Igaz, R., Ružiak, I., dan Réh, R. 2020. Optimization of parameters for the cutting of wood-based materials by a CO₂ laser. *Applied Sciences*. 10(22): 8113.

- Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). 2020. Hutan Dan Deforestasi Indonesia Tahun 2019.
http://ppid.menlhk.go.id/siaran_pers/browse/2435
- Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). 2020. Pertanyaan Seputar REDD+ dan Implementasi REDD+ di Indonesia.
<https://ditjenppi.menlhk.go.id/berita-ppi/33-beranda/1804-faq.html>
- Krisnawati, H., Kallio, M., dan Kanninen, M. 2011. *Acacia mangium Willd.: ekologi, silvikultur dan produktivitas*. CIFOR.
- Luerdi, M. W, dan Wulandari, M. U. 2021. Kebijakan Indonesia Menolak Menggunakan Mekanisme Aathp Joint Emergency Response dalam Mengatasi Kebakaran Hutan Dan Lahan 2015. *Jurnal Ilmu Politik dan Komunikasi Volume XI No.*
- Luthfi, K. M, Sugiana, A, dan Suratman, F. Y. 2021. *Broken rail detection system using laser*. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1098, No. 4, p. 042045. IOP Publishing.
- 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. 88p.
- Martínez-Conde, A., Krenke, T., Frybort, S., dan Müller, U. 2017. Comparative analysis of CO₂ laser and conventional sawing for cutting of lumber and wood-based materials. *Wood Science and Technology*. 51 (2): 943-966.
- McKenzie, P, Brown, C. L, dan Carle, J. 2004. Plantations in the Asia-Pacific Region: an expanding resource. *What does it take?*, 7.
- Noor, G. S. 2014. Perkembangan hutan rakyat di Provinsi Kalimantan Selatan. *Jurnal Bina Praja: Journal of Home Affairs Governance*. 6(4): 307-314.
- Nugroho, A, Hutama, A. S, dan 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.
- Nuraini. Wulandari, F.T. dan Dwi Sukma Rini, D.S. 2018. Pengaruh perbandingan serbuk gergaji dan semen terhadap sifat fisika papan semen partikel dari limbah serbuk penggergajian. *Skripsi*. Universitas Mataram.
- Nurwati dan Sinaga. 2007. *Sifat Fisik Beberapa Jenis Kayu HTI*. *Proceeding Diskusi Sifat dan Kegunaan Jenis Kayu HTI*. Badan Litbang Kehutanan, Jakarta.

- Nurwati, H, Hadi, YS, dan Setyaningsih, D, 2007. Sifat Fisis dan Mekanis Sepuluh Provenans Kayu Mangium (*Acacia Mangium Willd*) dari Patung Panjang Jawa Barat. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia. Vol. 5.(1): 7-11.
- Oberhofnerová, E, Pánek, M, and García-Cimarras, A. 2017. The effect of natural weathering on untreated wood surface. *J. Maderasciencia Tecnología*. 19 (2) :173–184.
- Ogana, R. M. 2018. *Pengaruh Variasi Cutting Speed Terhadap Kekasaran Permukaan SS316l pada Proses Laser Cutting*. Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya.
- Pandit, I. K, Nandika, D, dan Darmawan, I. W. 2011. Analisis sifat dasar kayu hasil hutan tanaman rakyat. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 16(2): 119-124.
- Pasai, M. 2020. Dampak kebakaran hutan dan penegakan hukum. *Jurnal Pahlawan*, 3(1): 36-46.
- Prakosa, G.G., Muttaqin, T., Harjoko. 2018. Sifat fisik dan keawetan kayu cemara gunung (*Casuarina junghuniana*) di pegunungan Bromo Kabupaten Probolinggo. *Jurnal Daun*. 5(2): 71-82.
- Prayoga, S. 2020. *Pengaruh Durasi Perlakuan Panas dengan Minyak (Oil Heat Treatment) terhadap Perubahan Sifat Fisis dan Mekanis Kayu Akasia (Acacia mangium) dan Kayu Jabon (Anthocephalus cadamba)*. Doctoral dissertation. Universitas Lampung.
- Purba, R. E. S, Irwan, I, dan Nurmaidah, N. 2017. Pemanfaatan Limbah Serbuk Gergaji Kayu Sebagai Substitusi Campuran Bata Ringan Kedap Suara. *Journal of Civil Engineering Building and Transportation*, 1(2), 87-95.
- Puspita, A, Sachari, A, dan Andar Bagus Sriwarno. B. A. 2016. Dinamika budaya material pada desain furnitur kayu di Indonesia. *Jurnal Panggung Seni Budaya*. 26(3):247-260.
- Radam, R. R. 2011. Studi Produktivitas dan Rendemen Industri Penggergajian Kayu Akasia Daun Lebar (*Acacia mangium Willd*) di Kecamatan Landasan Ulin Kota Banjarbaru Kalimantan Selatan. *Jurnal Hutan Tropis*. 12(31).
- Rahman, A, F. 2022. *Pengaruh Daya Laser CO2 terhadap Kekasaran Permukaan dan Warna Permukaan Kayu Sengon (Paraserianthes falcataria) dan Kayu Meranti (Shorea spp)*. Doctoral dissertation. Universitas Lampung.

- Sains, P. F, Tarumingkeng, I. R. C, Coto, M. P. D. I. Z, dan Hardjanto, M. S. 2005. Pelapukan Kayu Oleh Jamur dan Strategi Pengendaliannya. *Makalah IPB*. Bogor.
- Salama, A, Yan, Y, Li, L, Mativenga, P, Whitehead, D, and Sabli, A. 2016. Understanding the self-limiting effect in picosecond laser single and multiple parallel pass drilling/machining of CFRP composite and mild steel. *Materials dan Design*. 107(1):461-469.
- Samarya, T, Y. 2015. Aplikasi laser CO₂ untuk pemotongan (*cutting*) material menggunakan mesin CNC (*Control Numeric Computer*). *Jurnal FMipa*. 10(1).
- 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)*. 1st International Conference on Art, Craft, Culture and Design 2017. Bandung Institute of Technology.
- Saputro, A. E. dan Darwis, M. 2020. Rancang bangun mesin laser engraver and cutter untuk membuat kemasan modul praktikum berbahan akrilik. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*. 2(1):40-50.
- Sari, W. P, Ardi, A, dan 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.
- Sittadewi, E. H. 2016. Mitigasi lahan terdegradasi akibat penambangan melalui revegetasi. *Jurnal Sains dan Teknologi Mitigasi Bencana*. 11(2):50-60.
- Slamet, S, Harmoko, S, Hariyanto, H, dan Suyitno, S. Akurasi dan Produktivitas Mesin Laser Cutting untuk Memproduksi Alat Pelindung Diri (APD) Covid-19. 2021. *Journal of Mechanical Design and Testing*. 3(2):83-92.
- Sudarsono, S, Yudoyono, G, Faridawati, F, Sunarno, H, Puspitasari, N, dan Pramono, Y. H. 2018. Fabrikasi Kanal Mikro pada Substrat Akrilik menggunakan Laser Cutting CO₂. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 14(3):78-83.
- Suharti, S, dan Widiarti, A. 2005. Nilai Ekonomi Penurunan Daur Tebang *Acacia Mangium Willd.* di Hutan Tanaman Industri Pt. Arara Abadi, Riau. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*. 2(6):619-630.
- Sulton, A. 2021. *Perbandingan Hasil Proses Manufaktur Bilah Micro Wind Turbine Secara Manual dan Mesin Cnc Menggunakan Metode Qcd*. Doctoral dissertation. Universitas Islam Indonesia.

- Susanti, A. 2014. *Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Jenis Kayu untuk Bahan Baku Mebel dengan Menggunakan Metode Simple Additive Weighting (Saw)*. Doctoral Dissertation. Universitas Muhammadiyah Gresik.
- Susanto, M, Naiem, M, Hardiyanto, E. B, dan Prayitno, T. A. 2013. Variasi Genetik Sifat-sifat Kayu Uji Keturunan Acacia Mangium Umur 5 Tahun Di Wonogiri, Jawa Tengah (Genetic Variation of Wood Properties in Progeny Trial of Acacia Mangium on 5 Years Old in Wonogiri, Central Java). *Jurnal Manusia dan Lingkungan*. 20(3):312-323.
- Sutandar, Erwin, Ferry Juniardi dan Syahrudin Syahrudin. 2021 "Sifat Fisis Dan Mekanis Kayu Bengkirai. *Jurnal Teknik-Sipil*. 21.1.
- Syafii, W, dan Siregar, I. Z. 2006. Sifat Kimia dan Dimensi Serat Kayu Mangium (*Acacia mangium Willd.*) dari Tiga Provenans. Chemical Properties and Fiber Dimension of Acacia mangium Willd. from Three Provenances. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 4(1):28-32.
- Syarief, A, dan Gumai, A. M. 2017. Proses Manufaktur Mesin Gergaji Kayu untuk Pengrajin Palet Kayu. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*. 2(1):1-10.
- Tyas, D. P. 2020. *Potensi Ekowisata di Hutan Mangrove Desa Sriminosari Kecamatan Labuhan Maringgai untuk Ekopedagogi kepada Masyarakat*. Doctoral dissertation. Universitas Muhammadiyah Metro.
- Uslan, I. (2005). CO2 laser cutting: kerf width variation during cutting. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*. 219(8): 571-577.
- Vay, O, De Borst, K, Hansmann, C, Teischinger, A, and Müller, U. 2015. Thermal conductivity of wood at angles to the principal anatomical directions. *Wood science and technology*. 49(1):577-589.
- Wahyu, D dan Nugroho, M. 2008. Tinjauan Hasil-hasil Penelitian Faktor-faktor Alam yang Mempengaruhi Sifat Fisik dan Mekanik Kayu Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia. 5(1):85-100.
- Wibawa, A. A, Herawati, D. A, dan Budianto, G. P. I. 2018. D. Andang Arif Wibawa Introduksi Teknologi Penggunaan Mesin Bor dan Mesin Gergaji dalam Upaya Peningkatan Produktivitas Sangkar Burung. Dimas Budi: *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Setia Budi*. 2(2), 41-45.

- Winarbawa, H. dan Nugroho, G. 2017. Investigasi parameter pemotongan komposit unsaturated polyester/serat daun agel dengan laser CO₂. *Tesis*. Universitas Gajah Mada.
- Xu, Y, Wang, B, and Shen, Y. 2017. Study on laser cutting technology of bamboo. *Wood Research*. 62(4). 645-658.
- Yama, D, Muin, A, dan 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).
- Zhou, B. H., dan Mahdavian, S. M. 2004. Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO₂-laser. *Journal of materials processing technology*. 146(2): 188-192.