

**OPTIMASI VARIABEL PROSES PEMOTONGAN KAYU LAPIS
SENGON (*Paraserianthes falcataria*) DENGAN LASER CO₂
MENGUNAKAN *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)**

(Skripsi)

Oleh

**Muhammad Dimaz Nugraha
1914151050**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

OPTIMASI VARIABEL PROSES PEMOTONGAN KAYU LAPIS SENGON (*Paraserianthes falcataria*) DENGAN LASER CO₂ MENGUNAKAN *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)

Oleh

MUHAMMAD DIMAZ NUGRAHA

Pemanfaatan kayu secara umum digunakan sebagai bahan konstruksi dalam industri bangunan. Namun, ketersediaan kayu solid di Indonesia mengalami pengurangan serta harganya terus meningkat dari tahun ke tahun. Untuk mengatasinya, maka penggunaan kayu komposit menjadi alternatif salah satunya dengan penggunaan kayu lapis. Permintaan konsumen akan kayu dekoratif yang meningkat, maka diperlukan inovasi dalam produksi agar lebih produktif dan efisien sehingga produsen mampu bersaing dalam dunia pasar. Mesin laser cutting pun hadir untuk menjawab permasalahan tersebut. Penelitian ini penting untuk dilakukan untuk mengetahui pengaruh intensitas daya laser, tinggi nozzle dan kecepatan potong pada pemotongan kayu lapis sengon, sehingga mendapatkan hasil pemotongan terbaik. Penelitian ini menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan faktor daya laser dan kecepatan laser dengan menggunakan 13 sampel pemotongan. Hasil Penelitian ini menunjukkan bahwa daya dan kecepatan pemotongan kayu lapis menggunakan laser CO₂ mempengaruhi lebar dan kedalaman garitan, perubahan warna dan kekasaran pada kayu lapis sengon.

Kata Kunci : Pemotongan Kayu Lapis, Laser CO₂, *Response Surface Methodology* (RSM).

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF CO₂ LASER CUTTING VARIABLES OF SENGON PLYWOOD (*Paraserianthes falcataria*) USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)

By

MUHAMMAD DIMAZ NUGRAHA

Wood utilization is generally used as a construction material in the building industry. However, the availability of solid wood in Indonesia has decreased and the price continues to increase from year to year. To overcome this, the use of composite wood is an alternative, one of which is the use of plywood. Consumer demand for decorative wood is increasing, so innovation in production is needed to be more productive and efficient so that producers can compete in the market world. Laser cutting machines are also present to answer these problems. This research is important to do to determine the effect of laser power intensity, nozzle height and cutting speed on cutting sengon plywood, so as to get the best cutting results. This research used Response Surface Methodology (RSM) with laser power and laser speed factors using 13 cutting samples. The results of this study show that the power and speed of cutting plywood using a CO₂ laser affect the width and depth of the kerf, discoloration and roughness of sengon plywood.

Keywords : *Plywood Cutting, CO₂ Laser, Response Surface Methodology (RSM).*

**OPTIMASI VARIABEL PROSES PEMOTONGAN KAYU LAPIS
SENGON (*Paraserianthes falcataria*) DENGAN LASER CO₂
MENGUNAKAN *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM)**

Oleh

MUHAMMAD DIMAZ NUGRAHA

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian
Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : **OPTIMASI VARIABEL PROSES
PEMOTONGAN KAYU LAPIS SENGON
(*Paraserianthes falcataria*) DENGAN LASER
CO₂ MENGGUNAKAN *RESPONSE SURFACE
METHODOLOGY* (RSM)**

Nama : **Muhammad Dimaz Nugraha**

NPM : 1914151050

Jurusan : Kehutanan

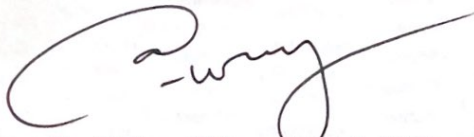
Fakultas : Pertanian

Tanggal Pengajuan : 23 April 2024

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing I

Ketua Jurusan Kehutanan



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

NIP 197911142009121001



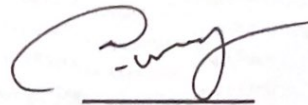
Dr. Hj. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P.IPM.

NIP 197310121999032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

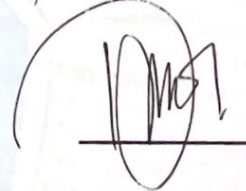
Ketua : **Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.**



Sekretaris : **Dian Iswandaru, S.Hut., M.Sc.**



Anggota : **Duryat, S.Hut., M.Si.**



2. Dekan Fakultas Pertanian



E. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP. 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **2 Maret 2024**

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Dimaz Nugraha
NPM : 1914151050
Jurusan : Kehutanan
Alamat Rumah : Jl. Assofa, Sukabumi Utara, Kebon Jeruk, Jakarta Barat

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

“Optimasi Variabel Proses Pemotongan Kayu Lapis Sengon (*Paraserianthes falcataria*) dengan Laser CO₂ menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM)”.

Adalah benar karya saya sendiri, yang saya susun dengan norma dan etika akademik yang berlaku saat ini. Jika dikemudian hari terbukti pernyataan saya ini tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 22 Maret 2024
Yang menyatakan.



Muhammad Dimaz Nugraha
NPM. 1914151050

RIWAYAT HIDUP



Muhammad Dimaz Nugraha (Penulis), atau akrab disapa Dimaz lahir di Jakarta, 22 Mei 2001, sebagai anak pertama dari Bapak Mulyana dan Ibu Sri Murni. Pendidikan Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN Grogol Utara 03 Pagi pada tahun 2013, Sekolah Menengah Pertama (SMP) diselesaikan di SMP Negeri 75 Jakarta Barat pada tahun 2016, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di selesaikan di SMA Negeri 78 Jakarta Barat pada tahun 2019. Penulis melanjutkan pendidikan dan terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur penerimaan Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama kuliah, penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Jurusan Kehutanan (Himasyulva) Universitas Lampung sebagai Anggota Bidang Komunikasi, Informasi dan Pengabdian Masyarakat pada kepengurusan tahun 2021 dan Ketua Bidang Komunikasi, Informasi dan Pengabdian Masyarakat tahun 2022. Kegiatan keprofesian yang pernah diikuti Penulis yaitu mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Kelurahan Cengkareng Barat, Kecamatan Cengkareng, Kota Jakarta Barat pada bulan Januari-Februari 2022. Penulis juga mengikuti kegiatan Praktik Umum (PU) di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Getas dan Wanagama, Jawa Tengah pada bulan Agustus 2022 selama 20 hari. Penulis juga menulis artikel yang dipublikasikan pada Jurnal Sylva Indonesiana dengan judul artikel yaitu “Optimization of CO₂ Laser Cutting Variables of Sengon Plywood (*Paraserianthes falcataria*) using Response Surface Methodology (RSM)”

***Ku persembahkan Karya Tulis ini dengan penuh rasa bangga
untuk kedua orang tuaku tersayang,
Ayahanda Mulyana dan Ibunda Sri Murni***

SANWACANA

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas segala berkat rahmat dan karunia-Nya serta sholawat dan salam tak lupa pula penulis curahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi yang berjudul “Optimasi Variabel Proses Pemotongan Kayu Lapis Sengon (*Paraserianthes falcataria*) dengan Laser CO₂ menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM)”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan studi dan menempuh gelar Sarjana Kehutanan di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Dengan berbagai keterbatasan, disadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini bukan semata mata ditulis berdasarkan kemampuan pribadi, melainkan karena mendapat bantuan dari berbagai pihak sehingga penyusunan skripsi ini bisa terselesaikan dengan baik. Pada kesempatan ini, dengan segala ketulusan hati dan kerendahan hati, terucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
2. Ibu Dr. Hj. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P.IPM. selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Slamet Budi Yuwono, M.S. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan motivasi kepada penulis selama menempuh perkuliahan sampai menyusun skripsi, arahan, perhatian, nasihat, dan doa.
4. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku dosen pembimbing satu saya yang telah memberikan arahan, motivasi perhatian, nasihat, dan doa dalam pembuatan skripsi. Sehingga skripsi ini dapat selesai.
5. Bapak Dian Iswandaru, S.Hut., M.Sc. dan Bapak Duryat, S.Hut., M.Si. selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan bimbingan dan arahan.

6. Segenap dosen Jurusan Kehutanan yang telah memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis selama menuntut ilmu di Jurusan Kehutanan Universitas Lampung.
7. Kedua orang tua dan adik penulis yang telah memberikan doa, teguran, semangat, motivasi dan memberikan dukungan moril maupun materil hingga Penulis menempuh langkah sejauh ini.
8. Tim konsentrasi Teknologi Hasil Hutan 2019, Lusy Rahmawati, Hade Afkar, Daffa Naufalian Fauzi, M. Alfaridzi, Ukhti Assyifa, dan Porto Mauritio.
9. Saudara seperjuangan angkatan 2019 (FORMICS).
10. Keluarga besar Himasyilva Universitas Lampung.
11. Serta kepada seluruh pihak yang terlibat dalam proses penelitian dan penyusunan skripsi secara langsung maupun tidak langsung yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, akan tetapi penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada para pembaca.

Bandar Lampung, 22 Maret 2024

Muhammad Dimaz Nugraha

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL	ixiii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	4
1.3. Kerangka Pemikiran	4
1.4. Hipotesis	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Kayu Lapis (<i>Plywood</i>)	7
2.2. Sengon (<i>Paraserianthes falcataria</i>)	8
2.3. Laser	9
2.4. Jenis-Jenis Laser.....	10
2.4.1. Laser He-Ne.....	11
2.4.2. Laser DPSS (<i>Diode-Pumped Solid State</i>).....	11
2.4.3. LaserNd-YAG	11
2.4.4. Laser CO ₂	12
2.5. Optimasi	13
2.6. RSM (<i>Response Surface Methodology</i>)	14
2.7. Pengaruh Laser CO ₂ terhadap Kualitas Pemotongan Kayu Lapis	15
III. METODE PENELITIAN	19
3.1. Waktu dan Tempat	19
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	19

3.3. Rancangan Penelitian.....	19
3.4. Prosedur Penelitian	20
3.4.1. Persiapan dan Pengaturan Mesin Laser CO ₂	20
3.4.2. Perancangan Desain Percobaan	21
3.4.3. Persiapan Kayu Lapis	23
3.5. Mekanisme Pelaseran Papan Kayu Lapis Sengon	23
3.6. Pengujian Kedalaman dan Lebar Garitan	24
3.7. Pengujian Perubahan Warna	25
3.8. Uji Kekasaran Permukaan	26
3.9. Optimasi Menggunakan RSM.....	27
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1. Lebar dan Kedalaman Garitan.....	29
4.2. Perubahan Warna	32
4.3. Uji Kekasaran	41
4.4. Optimasi dan Verifikasi Proses Pelaseran	43
V. SIMPULAN DAN SARAN	46
5.1. Kesimpulan	46
5.2. Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Kerangka Pemikiran.	5
Gambar 2. Mesin laser CO ₂ CNC LS-6040 50 Watt.....	21
Gambar 3. Corel Laser DRW X7.	21
Gambar 4. Desain Percobaan pada <i>Software Design Expert</i> 13.	22
Gambar 5. Pengisian Respon dalam Desain Percobaan.....	22
Gambar 6. Tabel Data Awal.	23
Gambar 7. Skema Arah Pemotongan Laser.....	24
Gambar 8. Metode yang digunakan untuk Mengukur Dimensi Kedalaman Garitan dan Lebar Garitan.....	25
Gambar 11. Grafik 3D dari Nilai Lebar Garitan Pemotongan Kayu Lapis Sengon dengan Kombinasi Daya Laser dan Kecepatan Laser.	31
Gambar 12. Grafik 3D dari Nilai Kedalaman Garitan Pemotongan Kayu Lapis Sengon dengan Kombinasi Daya Laser dan Kecepatan Laser.	32
Gambar 13. Perubahan Warna pada Pemotongan Kayu Lapis Sengon.	33
Gambar 14. Perubahan Nilai L* pada Kayu Lapis Sengon.....	34
Gambar 15. Grafik 3D dari Nilai L* Pemotongan Kayu Lapis Sengon dengan Kombinasi Daya Laser dan Kecepatan Laser.	35
Gambar 16. Perubahan Nilai A* pada Kayu Lapis Sengon.	36
Gambar 17. Grafik 3D dari Nilai A* Pemotongan Kayu Lapis Sengon dengan Kombinasi Daya Laser dan Kecepatan Laser.	37
Gambar 18. Perubahan Nilai B* pada Kayu Lapis Sengon.....	38
Gambar 19. Grafik 3D dari Nilai B* Pemotongan Kayu Lapis Sengon dengan Kombinasi Daya Laser dan Kecepatan Laser.	39
Gambar 20. Perubahan Nilai ΔE^* pada Kayu Lapis Sengon.	40

Gambar 21. Grafik 3D dari Nilai ΔE^* Pemotongan Kayu Lapis Sengon dengan Kombinasi Daya Laser dan Kecepatan Laser.....	41
Gambar 22. Perubahan Nilai Kekasaran pada Kayu Lapis Sengon.....	42
Gambar 23. Grafik 3D dari Nilai Kekasaran Pemotongan Kayu Lapis Sengon dengan Kombinasi Daya Laser dan Kecepatan Laser.	43
Gambar 24. Uji Lebar dan Kedalaman Garitan Kayu Lapis Sengon.	58
Gambar 25. Hasil Uji ANOVA Lebar Garitan Kayu Lapis Sengon.	58
Gambar 26. Hasil Uji ANOVA Kedalaman Garitan Kayu Lapis Sengon.....	59
Gambar 27. Hasil Uji ANOVA nilai L^* Pemotongan Kayu Lapis Sengon. ...	59
Gambar 28. Hasil Uji ANOVA nilai L^* Pemotongan Kayu Lapis Sengon. ...	60
Gambar 29. Hasil Uji ANOVA nilai L^* Pemotongan Kayu Lapis Sengon. ...	60
Gambar 30. Hasil Uji ANOVA nilai L^* Pemotongan Kayu Lapis Sengon. ...	60
Gambar 31. Hasil Uji ANOVA nilai L^* Pemotongan Kayu Lapis Sengon. ...	61

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi Perubahan Warna.....	26
Tabel 2. Nilai Lebar dan Kedalaman Garitan Kayu Lapis.....	29
Tabel 3. Kriteria Penentuan Kombinasi Optimum Proses Pelaseran Kayu Lapis Sengon.....	43
Tabel 4. Respon Verifikasi Model Kombinasi Daya dan Kecepatan Laser. ..	45

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan kawasan hutan terluas di dunia. Menurut data pengukuhan kawasan hutan tahun 2018, Indonesia memiliki luas hutan sebesar 125,92 juta ha yang terbagi dalam kawasan hutan lindung, hutan produksi dan hutan konservasi (Direktorat Jenderal Pengendalian DAS dan Hutan Lindung, 2020). Dengan luasnya wilayah hutan tersebut, Indonesia menjadi negara terpenting sebagai penghasil berbagai produk kayu bulat tropis seperti kayu lapis, kayu gergajian serta *pulp* dan kertas (Nurjanah, 2018; Haryanto *et al.*, 2021). Pemanfaatan kayu secara umum digunakan sebagai bahan konstruksi dalam industri bangunan (Ridjayanti 2021; Rafly *et al.*, 2022). Namun ketersediaan kayu solid di Indonesia mengalami pengurangan serta harganya terus meningkat dari tahun ke tahun (Hidayat *et al.*, 2017a; Utami *et al.*, 2023). Untuk mengatasinya, maka penggunaan kayu komposit menjadi alternatif salah satunya dengan penggunaan kayu lapis. Kayu lapis merupakan produk komposit kayu yang terbuat dari perekatan lembaran-lembaran vinir yang disusun secara bersilangan tegak lurus (Somadona *et al.*, 2016). Di Indonesia sendiri produksi kayu lapis tahun 2022 sebesar 8.871.091 m³ (BPS, 2023).

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), merupakan perangkat listrik optik yang menghasilkan radiasi koheren. Laser merupakan perangkat yang memperkuat berkas cahaya koheren yang intens dan sempit, laser saat ini banyak digunakan dalam industri pemotongan dan pengukiran, dalam operasi untuk pengobatan, serta penelitian ilmiah (Badoniya, 2018). Selama periode 1960-an laser ditemukan, laser mulai diaplikasikan dalam berbagai

industri pemotongan mengingat laser memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Laser sukses diaplikasikan untuk memotong cetakan kayu lapis dalam industri pengepakan (Kubovský *et al.*, 2020).

Pemanfaatan kayu sebagai bahan dekorasi rumah sangat populer dengan proses balok kayu dipotong secara manual dengan desain berulang yang biasanya dipasang di pagar maupun dinding rumah (Ibrahim dan Kesevaan, 2018). Permintaan konsumen akan kayu dekoratif yang meningkat, maka diperlukan inovasi dalam produksi agar lebih produktif dan efisien sehingga produsen mampu bersaing dalam dunia pasar. Mesin laser *cutting* pun hadir untuk menjawab permasalahan tersebut. Laser *cutting* dapat membuat pola yang rumit dengan mudah, serta prosesnya dikontrol dengan komputer sehingga menghasilkan produk yang memiliki akurasi serta presisi yang baik (Sudarsono *et al.*, 2018).

Pemotongan dengan menggunakan laser menggelapkan permukaan potong sehingga menciptakan efek dekoratif pada permukaan potong (Kubovský *et al.*, 2016). Penggunaan laser dalam pemotongan sangatlah presisi dibandingkan dengan pemotongan konvensional karena menghasilkan lebar goresan yang sempit, fleksibilitas dalam memulai dan menyelesaikan pemotongan di berbagai posisi papan, serta menciptakan permukaan yang halus. Selain itu keuntungan lainnya mampu mengurangi kebisingan dan pengurangan jumlah serbuk gergaji (Očkajová *et al.*, 2020; Kučerka dan Očkajová, 2018). Dalam industri pemotongan maupun pengukiran, laser CO₂ menjadi yang paling cocok terhadap penggunaan material kayu. Eltahwani *et al.* (2013) menyimpulkan bahwa laser CO₂ sangat cocok dalam pemrosesan kayu karena panjang gelombang gas CO₂ dan kepadatan energi membelikan kualitas terbaik dalam pemotongan. Penggunaan laser CO₂ menciptakan sinar laser terpolarisasi ke arah pemotongan sehingga menciptakan goresan yang sempit dengan tepi lurus yang tajam. Pada pemotongan kayu menggunakan laser CO₂, parameter seperti daya laser dan kecepatan pemotongan mempengaruhi proses pemotongan kayu lapis. Eltahwani *et al.* (2011) meneliti parameter pemotongan laser CO₂ pada kayu komposit MDF

(*Medium Density Fiberboard*) dan menyatakan bahwa kualitas pemotongan dipengaruhi oleh daya laser, kecepatan potong, tekanan udara, dan posisi titik fokus. Menurut Yusoff *et al.* (2008), tinggi *nozzle* dan ukuran *nozzle* juga menentukan kualitas potong pada beberapa jenis kayu.

Sengon (*Paraserianthes falcataria*) sangat potensial untuk dipilih sebagai salah satu komoditas dalam pembangunan hutan tanaman, karena memiliki nilai ekonomis tinggi dan ekologis yang luas (Tarigan *et al.*, 2021). Keunggulan ekonomi pohon sengon adalah termasuk jenis pohon cepat tumbuh (*Fast Growing Species*), pengelolaannya relatif mudah dan permintaan pasar yang terus meningkat (Wijaya *et al.*, 2021). Kayu sengon saat ini juga sudah menjadi salah satu jenis kayu yang berfungsi memasok kebutuhan bahan baku industri, seperti kayu pertukangan dan kayu pulp (Utama *et al.*, 2019; Rafly *et al.*, 2022). Kayu Sengon dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan, antara lain mebel, kayu gergajian, pembuatan kayu lapis, palet, dan bahan bangunan (Dayadi, 2021; Ridjayanti, 2021).

Salah satu cara untuk menghemat tenaga, waktu, dan biaya dan dapat mengoptimalkan faktor-faktor dalam proses pemotongan adalah dengan menggunakan perencanaan eksperimen berbasis statistika yaitu *Response Surface Methodology* (RSM) (Agustian *et al.*, 2021). RSM adalah suatu metode matematika dan statistika yang digunakan dalam pemodelan dan analisis situasi di mana respon dipengaruhi oleh beberapa variable dengan tujuan untuk mengoptimalkan respon tersebut. RSM merupakan metode optimisasi yang melibatkan penyesuaian nilai-nilai variabel bebas atau faktor agar mencapai nilai respon yang optimal, baik yang tertinggi maupun yang terendah (Aziz dan Saraswati *et al.*, 2022).

Penelitian mengenai optimasi parameter pemotongan menggunakan Laser CO₂ untuk mendapatkan kualitas pemotongan terbaik terutama produk kayu lapis masih sangat sedikit dilakukan. Ibrahim dan Kesevaan (2018) meneliti tentang parameter terbaik untuk memotong panel kayu dekoratif berbahan dasar *Wood*

Plastic Composite (WPC). Eltawahni *et al.* (2013) meneliti tentang pengaruh parameter proses pemotongan laser CO₂ pada fitur kualitas tepi potong untuk mencapai fitur kualitas yang diinginkan dengan biaya operasi yang masuk akal dan beberapa penelitian lainnya. Di Indonesia sendiri penelitian mengenai optimasi parameter pemotongan menggunakan laser CO₂ pada produk kayu komposit belum ada yang melakukan, terutama pada kayu lapis sengan. Oleh karena itu penelitian ini penting untuk dilakukan untuk mengetahui pengaruh intensitas daya laser, tinggi nozzle dan kecepatan potong pada pemotongan kayu lapis, sehingga mendapatkan hasil pemotongan terbaik.

1.2. Tujuan Penelitian

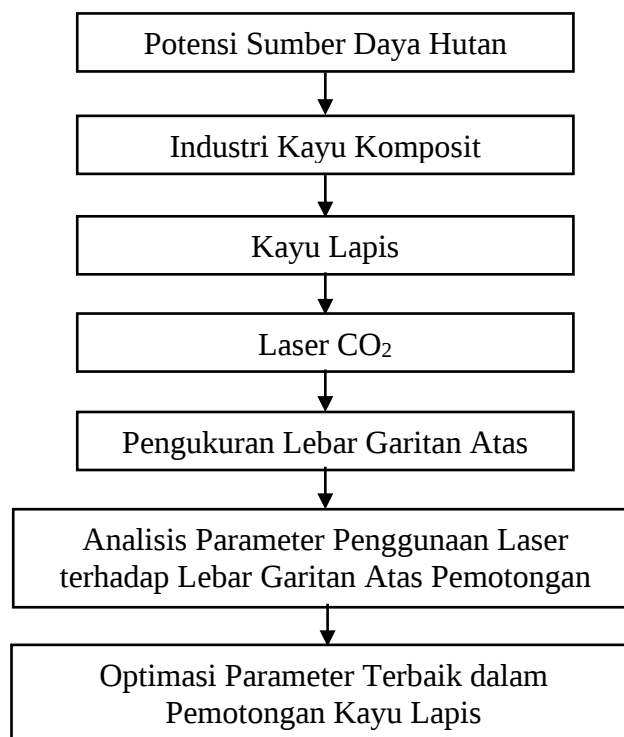
Tujuan dari penelitian ini adalah;

1. Mengetahui pengaruh intensitas daya laser CO₂ terhadap kualitas pemotongan kayu lapis.
2. Mengetahui pengaruh kecepatan potong laser CO₂ terhadap kualitas pemotongan kayu lapis.
3. Menganalisis parameter pemotongan laser CO₂ untuk mendapatkan kualitas pemotongan optimal pada kayu lapis.

1.3. Kerangka Pemikiran

Ketersediaan kayu solid di Indonesia mengalami pengurangan serta harganya terus meningkat dari tahun ke tahun. Pemanfaatan kayu sebagai bahan dekorasi rumah sangat populer yang biasanya dipasang di pagar maupun dinding rumah. Permintaan konsumen akan kayu dekoratif terus meningkat, sehingga diperlukan inovasi dalam penggunaan kayu terutama penggunaan produk turunan kayu serta peningkatan produktifitas agar lebih efisien dalam prosesnya. Potensi produk kayu komposit terutama kayu lapis sebagai pengganti kayu solid sebagai bahan dekoratif tergolong banyak namun proses produksi yang masih tradisional memiliki tingkat efisiensi dan produktifitas yang rendah. Penggunaan laser CO₂ dapat menjadi inovasi dalam produk berbasis kayu komposit terutama

kayu lapis. Pemotongan menggunakan laser CO₂ dapat memberikan hasil yang memiliki tingkat akurasi dan presisi yang tinggi serta mampu membuat pola yang rumit dengan mudah. Selain itu pemotongan laser menggelapkan permukaan potong sehingga menciptakan efek dekoratif. Kemudian dengan mengetahui pengaruh kecepatan potong dan daya laser pada laser ini dapat ditentukan parameter yang optimal dalam pemotongan menggunakan laser CO₂ sehingga terciptanya hasil potong terbaik. Berdasarkan uraian tersebut dapat dilihat kerangka penelitian yang telah disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran.

1.4. Hipotesis

Hipotesis dalam penelitian ini yaitu :

1. Daya dan kecepatan laser mampu mempengaruhi kualitas pemotongan kayu lapis.
2. Semakin cepat dan semakin tinggi daya laser dapat memaksimalkan proses pemotongan pada kayu lapis.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kayu Lapis (*Plywood*)

Kayu lapis merupakan tumpukan vinir (lembaran tipis kayu) yang direkatkan secara bersama-sama menggunakan perekat (Somadona *et al.*, 2016). Kayu lapis diciptakan untuk memenuhi kebutuhan akan material kayu sebagai pengganti kayu solid (Malau *et al.*, 2022). Kayu lapis dimanfaatkan untuk berbagai produk seperti furnitur, kerajinan tangan, lantai, dan dekorasi interior maupun eksterior (Septianingrum dan Wibisono, 2023). Kayu lapis adalah hasil olahan kayu yang terdiri dari lembaran-lembaran kayu yang disatukan dengan menggunakan tekanan tinggi, dengan variasi ketebalan 3 mm hingga 18 mm (Lobang dan Nurrachmania, 2021).

Secara umum, harga kayu lapis lebih mahal dibandingkan jenis kayu olahan lainnya, tetapi lebih murah dibandingkan dengan kayu solid (Rafik dan Cahyani, 2017). Proses pembuatan kayu lapis melibatkan beberapa tahapan, antara lain pemotongan kayu bulat, pengupasan atau pembuatan vinir, persiapan vinir, penyusunan vinir, pemotongan tepi kayu lapis, dan pengampelasan kayu lapis (Kusumaningrum *et al.*, 2022). Kelebihan kayu lapis diantaranya memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan dengan luas permukaannya, dapat disesuaikan ukurannya sesuai kebutuhan, dan dapat diseragamkan warna, tekstur dan pola seratnya sehingga coraknya dapat simetris (Somadona *et al.*, 2016).

Tahun 1990-an menjadi masa keemasan bagi kayu lapis di Indonesia dengan nilai ekspor yang terus meningkat. Tahun 1992 Indonesia merupakan negara pengeksport kayu lapis terbesar di dunia dengan merubah pasar, dari pasar pembeli

menjadi pasar penjual (Sari dan Widyastutik, 2015). Saat ini kayu lapis mengalami penurunan produksi dikarenakan penurunan bahan baku dengan dengan produksi tahun 2018 sejumlah 4,2 juta m³, 2019 sejumlah 4,1 juta m³ dan pada tahun 2020 sejumlah 3,8 juta m³ (BPS, 2020).

2.2. Sengon (*Paraserianthes falcataria*)

Kayu sengon merupakan salah satu varietas kayu yang umum ditemukan di Indonesia (Wijaya *et al.*, 2022) . Jenis kayu ini sering dijadikan tanaman perkebunan oleh masyarakat karena pertumbuhannya yang cepat. Kayu sengon dipilih sebagai tanaman hutan dan industri karena kemampuannya yang cepat tumbuh serta adaptasinya yang baik terhadap berbagai jenis tanah (Febrianto *et al.*, 2010; Hidayat *et al.*, 2011; Utama *et al.*, 2019; Hardianto *et al.*, 2020). Selain itu, karakteristik kayu sengon juga sangat cocok untuk industri kayu lapis (Priyanto, 2018). Kayu sengon memiliki klasifikasi awet IV-V dan kekuatan kelas IV-V, dengan kadar air sekitar 15%, dan berat jenis antara 0,24 hingga 0,49 g/cm³, masuk dalam kelas awet IV-V (Syahril *et al.*, 2022). Ketahanannya terhadap serangan rayap kayu kering termasuk dalam kelas III. Kayu sengon memiliki serat yang lurus dan sedikit kasar, namun relatif mudah untuk dikerjakan. Warna kayu terasnya sengon bervariasi mulai dari kuning berkilau hingga coklat-merah gading (Arifin *et al.*, 2022).

Keunggulan ekonomis dari pohon sengon termasuk kemampuan tumbuh dengan cepat (*fast growing species*), manajemennya relatif mudah, serta permintaan pasar yang terus meningkat (Ma'ruf *et al.*, 2023). Saat ini, kayu sengon telah menjadi salah satu bahan baku industri yang penting, digunakan dalam industri kayu pertukangan dan pulp (Hidayat *et al.*, 2011; Yunita *et al.*, 2023). Kayu sengon dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, termasuk pembuatan mebel, produk gergaji, kayu lapis, palet, dan bahan bangunan (Dayadi, 2021). Kayu sengon memiliki banyak pemanfaatan dalam berbagai keperluan, termasuk sebagai bahan konstruksi ringan seperti langit-langit, panel, interior, serta perabotan dan kabinet. Selain itu, kayu sengon juga cocok digunakan sebagai bahan kemasan ringan

untuk pembuatan paket, kotak, kotak cerutu dan rokok, peti kayu, dan palet (Krisnawati *et al.*, 2011). Bahkan, kayu sengon juga digunakan dalam pembuatan alat musik dan sebagai bahan baku dalam industri kertas pulp. Tak hanya itu, kayu sengon juga dimanfaatkan dalam produksi kayu lapis dan sebagai bahan dalam pembuatan perabotan rumah tangga. Klasifikasi tanaman sengon yaitu:

Kerajaan	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Kelas	: Dicotyledonae
Ordo	: Fabale
Famili	: Leguminosae
Genus	: <i>Paraserianthes</i>
Spesies	: <i>Paraserianthes falcataria</i> (L.) Nielsen

2.3. Laser

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) merupakan proses terstimulasinya emisi radiasi sehingga terjadi penguatan cahaya. Melalui proses emisi spontan, laser mampu memancarkan gelombang elektromagnetik yang bersifat koheren dimana cahaya yang dipancarkan frekuensinya sempit dan tidak menyebar (Badruzzaman *et al.*, 2016). Mesin laser memiliki berbagai kemampuan diantaranya:

- Memotong (*cutting*)
Cahaya laser diatur untuk menembus bahan sehingga potongan yang diinginkan dapat dilepaskan, memungkinkan penggunaan baik positif maupun negatif dari potongan tersebut. Proses pemotongan dilakukan dengan kecepatan sedang dan intensitas yang tinggi.
- Menggores (*marking*)
Penggunaan sinar laser hanya akan menciptakan kerusakan pada permukaan material, meninggalkan bekas goresan. Proses penggoresan dilakukan dengan kecepatan tinggi dan intensitas yang rendah.
- Gravir (*engraving*)

Cahaya laser disesuaikan untuk mengukir permukaan material dengan kedalaman yang bervariasi, memungkinkan pengenalan gambar atau huruf yang diukir. Proses pengukiran dilakukan dengan kecepatan yang lambat dan intensitas yang sedang.

- Melubangi (*perforating/punching*)
Cahaya laser disetel untuk melubangi material dalam bentuk lubang-lubang bulatan kecil. Proses perforasi dilakukan dengan kecepatan tinggi dan intensitas yang sedang.

Ada banyak material yang dapat dipotong dengan menggunakan laser, antara lain (Suharto dan Saputra, 2021):

- Akrilik
- MDF
- Tripleks/Multipleks
- Kayu Veneer Cork
- Karet
- Kulit
- Karton/kertas
- Kain (kain tertentu).

2.4. Jenis-Jenis Laser

Laser memiliki sifat-sifat yang unik yang membedakannya dari jenis sinar lainnya. Karena keunikan ini, laser dianggap sangat istimewa dibandingkan dengan sumber cahaya lainnya. Dari segi penyebaran cahayanya, laser dapat dibagi menjadi dua jenis utama: laser kontinu dan laser pulsa (Saro *et al.*, 2018). Setiap jenis laser memiliki karakteristiknya sendiri sesuai dengan jenisnya. Setiap jenis laser memiliki panjang gelombang, energi, dan profil berkas yang berbeda, yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan dalam aplikasinya (Manurung *et al.*, 2013).

2.4.1. Laser He-Ne

Laser Helium Neon (He-Ne) merupakan salah satu jenis laser gas yang paling umum dan ekonomis yang tersedia di pasar. Laser ini umumnya didesain untuk beroperasi pada panjang gelombang 632,8 nm, menghasilkan cahaya berwarna merah. Namun, terdapat juga variasi laser He-Ne dengan panjang gelombang yang berbeda, seperti 543,5 nm (hijau), 594,1 nm (kuning), 611,9 nm (jingga), dan lainnya. Penggunaan laser He-Ne sangat luas, sering digunakan dalam bidang holografi, spektroskopi, metrologi, perawatan medis, pemindaian kode batang (bar code scanning), dan sebagainya (Manurung *et al.*, 2013).

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

Sebuah laser pada bentuk paling dasarnya terdiri dari sebuah elemen penguat yang terletak dalam sebuah resonator optik. Untuk menghasilkan pancaran laser, elemen penguat harus distimulasi. Stimulasi ini bisa dilakukan melalui pelepasan listrik melalui plasma pada laser ion argon, atau dengan radiasi optik seperti yang dihasilkan oleh lampu. Pada beberapa jenis materi padat (namun tidak pada semikonduktor), media penguatan laser adalah isolator listrik, sehingga stimulasi optik menjadi metode yang paling efektif untuk memperkuat sinyal. Dioda pemompa adalah salah satu jenis pemompa optik yang memiliki karakteristik serupa dengan jenis pemompa optik lainnya (Manurung *et al.*, 2013).

2.4.3. LaserNd-YAG

Neodymium-doped yttrium aluminium garnet, atau Nd:YAG, adalah kristal yang sering digunakan sebagai media penguat dalam laser solid-state, yang menggunakan media padat. Teknologi ion neodymium dalam berbagai jenis kristal ionik menghasilkan pancaran cahaya pada panjang gelombang 1064 nm dari transisi atom tertentu dalam ion neodymium. Laser Nd-YAG merupakan salah satu jenis laser zat padat yang sangat dihargai, populer, dan digunakan

secara luas dalam berbagai bidang karena berbagai keunggulannya (Imrigha dan Suana, 2016).

2.4.4. Laser CO₂

Laser CO₂ merupakan salah satu jenis laser yang menghasilkan energi tinggi dan efisien dengan menggunakan gas CO₂. Pada laser ini, molekul CO₂ bergetar pada panjang gelombang 10,6 μm dalam spektrum inframerah. Transisi penting terjadi antara tingkat energi vibrasi molekul CO₂. Laser CO₂ dapat beroperasi dalam mode kontinu, pulsa, atau dengan menggunakan teknik Q-switching. Meskipun memiliki daya yang relatif rendah, bahkan hanya beberapa watt, laser CO₂ dapat memancarkan energi secara cepat yang mampu memotong berbagai material dengan presisi. Saat ini, laser CO₂ banyak digunakan dalam proses pemotongan logam, bahan tekstil, dan pengelasan logam (Manurung *et al.*, 2013).

Laser CO₂ memiliki beberapa keunggulan, antara lain tingkat akurasi yang tinggi dan keluaran daya yang besar. Biasanya, sekitar 5-20% dari daya yang digunakan untuk menghasilkan sinar, nilai ini merupakan yang tertinggi dibandingkan dengan jenis laser gas lainnya. Laser CO₂ menghasilkan panjang gelombang sekitar 9-11 μm , namun umumnya dianggap memiliki panjang gelombang utama sekitar 10,6 μm . Dengan panjang gelombang ini, laser CO₂ cocok digunakan untuk memproses material organik dan keramik (Martinez Conde *et al.*, 2017). Laser CO₂ beroperasi dengan daya laser tinggi pada material yang akan dipotong, menyebabkan material tersebut terbakar, meleleh, dan menguap karena pemanasan gas. Proses ini menciptakan tepi pada material dengan permukaan yang memiliki kualitas tinggi, terutama karena pengaruh gas nitrogen yang digunakan selama proses pemotongan (Samarya *et al.*, 2013).

Kondisi optimal untuk pemotongan laser pada kayu dan papan partikel ditentukan oleh beberapa parameter seperti tingkat kekuatan laser dan kecepatan pemotongan benda kerja yang berbeda. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses pemotongan kayu dan komposit kayu dengan laser dapat dibagi menjadi beberapa faktor, yaitu:

sifat berkas radiasi, sifat perangkat laser dan karakteristik proses pemotongan. Pengaturan parameter yang optimal untuk pemotongan dicapai dengan perubahan eksperimental meliputi kecepatan potong, komposisi gas bantu dan tekanannya, dan perubahan posisi sinar radiasi yang berfokus pada material (Kubovský *et al.*, 2020).

2.5. Optimasi

Model optimasi merupakan salah satu model analisa sistem yang diidentikkan dengan *operation research* (Nelwan *et al.*, 2013). Optimasi adalah proses pencarian solusi terbaik untuk suatu masalah yang menarik, dan sering melibatkan penggunaan berbagai agen yang bekerja bersama membentuk sistem agen yang berkembang. Ada berbagai teknik optimasi yang digunakan, seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Firefly Algorithm* (FA), *Bat Algorithm* (BA), *Cuckoo Search* (CS), *Ant Colony Optimization* (ACO), *Flower Pollination Algorithm* (FPA), dan *Weighted Superposition Attraction* (WSA). Teknik-teknik ini diterapkan secara luas di berbagai bidang penelitian, termasuk transportasi, telekomunikasi, pengolahan citra, desain rekayasa, dan perencanaan rute kendaraan (Nurkholis *et al.*, 2021).

Optimasi adalah proses untuk mencapai hasil terbaik dalam suatu permasalahan, dengan fokus pada mencari titik maksimum atau minimum dari suatu fungsi tujuan, tanpa melanggar batasan-batasan yang telah ditetapkan (Sari *et al.*, 2022). Persoalan optimasi umumnya berusaha untuk mengoptimalkan nilai suatu fungsi dengan beberapa variabel, dengan memperhatikan batasan-batasan yang ada. Batasan-batasan tersebut seringkali melibatkan faktor-faktor seperti tenaga kerja, keuangan, bahan baku, waktu, dan ruang. Prinsip optimasi produksi mencakup upaya untuk mengalokasikan faktor-faktor produksi yang terbatas sedemikian rupa sehingga penggunaannya menjadi seefisien mungkin, dengan tujuan memperoleh hasil yang optimal (Purba dan Ahyaningsih, 2020).

Teknik optimasi sangat bermanfaat dalam menangani berbagai masalah yang melibatkan pengoptimalan, baik itu untuk mencapai maksimum atau minimum.

Teknik optimasi merupakan alat untuk mengalokasikan sumber daya, seperti bahan baku, waktu, tenaga kerja, dan uang, sesuai dengan kebutuhan dan kondisi yang diinginkan (Suwirmayanti, 2018). Dengan menggunakan teknik ini, sumber daya yang terbatas dapat dimanfaatkan secara efisien untuk mencapai hasil yang optimal. Ada berbagai jenis teknik optimasi yang dapat digunakan, tergantung pada jenis proyek yang akan dioptimalkan. Misalnya, optimasi linier atau yang sering disebut program linier, yang digunakan untuk masalah dengan fungsi tujuan dan batasan yang linier. Kemudian, ada optimasi linier dengan variabel bilangan bulat, dikenal sebagai *Integer Linear Programming* (ILP), yang berguna ketika solusi yang diizinkan harus berupa bilangan bulat (Hanifa *et al.*, 2022). Selain itu, terdapat optimasi linier dengan variabel biner, dikenal sebagai *Binary Integer Linear Programming* (BILP), yang menggunakan variabel biner untuk menunjukkan kehadiran atau ketidakhadiran suatu keputusan. Semua teknik ini memiliki kegunaannya masing-masing dalam menyelesaikan permasalahan optimasi yang beragam (Nurjanna *et al.*, 2022).

2.6. RSM (*Response Surface Methodology*)

Desain eksperimental memegang peranan krusial dalam berbagai bidang ilmu dan industri. Eksperimen melibatkan pemberian perlakuan pada unit percobaan, yang kemudian menjadi bagian integral dari metode ilmiah dengan mengukur satu atau lebih tanggapan. Penting untuk mengamati proses dan operasi sistem dengan baik; oleh karena itu, untuk mencapai hasil yang diinginkan, seorang peneliti perlu merencanakan, merancang, serta menganalisis eksperimen. Salah satu desain eksperimental yang paling umum digunakan untuk optimasi adalah *Response Surface Methodology* (RSM). Metode ini memungkinkan evaluasi efek dari beberapa faktor dan interaksi di antara mereka terhadap satu atau lebih variabel respons. Dengan RSM, peneliti dapat mengeksplorasi dan memahami kompleksitas hubungan antara variabel input dan output dalam sistem, sehingga memfasilitasi proses pengoptimalan (Aydar, 2018).

RSM merupakan sintesis antara model matematika dan statistika yang umumnya diterapkan dalam pemodelan serta analisis proses di mana respon yang diinginkan dipengaruhi oleh beragam variabel (Braima *et al.*, 2016).

Montgomery (2005), menjelaskan bahwa tujuan dari metode ini adalah untuk memaksimalkan respons. RSM mengeksplorasi hubungan yang diperkirakan dengan tepat antara variabel input dan output, serta mengidentifikasi kondisi operasional yang optimal untuk sistem yang sedang dipelajari, atau rentang faktor yang memenuhi persyaratan operasional (Farooq *et al.*, 2013). *Box-Behnken Design* (BBD) dan *Central Composite Design* (CCD) adalah dua desain eksperimental utama yang digunakan dalam metodologi permukaan respon. *Central Composite Rotatable Design* (CCRD) dan *Face Central Composite Design* (FCCD) juga telah diterapkan pada studi optimasi dalam beberapa tahun terakhir (Aydar, 2018).

Keuntungan yang ditawarkan oleh RSM antara lain sebagai berikut, menentukan interaksi antara variabel independen, mengembangkan model matematis untuk sistem tersebut, serta mengurangi waktu dan biaya eksperimen dengan meminimalkan jumlah percobaan yang diperlukan (Boyacı, 2005; Agustian *et al.*, 2021). Kelemahan utama dari metode RSM adalah bahwa data eksperimen digunakan untuk memasang model polinomial pada tingkat kedua. Namun, tidak semua sistem mematuhi kelengkungan yang sesuai dengan model polinomial orde kedua. Selain itu, verifikasi eksperimental dari nilai-nilai yang diestimasi dalam model harus dilakukan secara cermat (Koç dan Kaymak, 2010).

2.7. Pengaruh Laser CO₂ terhadap Kualitas Pemotongan Kayu Lapis

Pemotongan menggunakan laser CO₂ dapat mempengaruhi sifat fisik kayu salah satunya kekasaran permukaan kayu. Kualitas kehalusan permukaan kayu memiliki peran yang sangat penting dalam komponen produk, terutama untuk produk yang terlibat dalam masalah seperti gesekan, pelumasan, dan keausan (Isyrouddin dan Sumbodo, 2020). Menurut Delima *et al.* (2022), hasil dari pengukuran kekasaran

permukaan merupakan material penting dalam menentukan kualitas suatu produk pada proses manufaktur. Terdapat beberapa alasan kekasaran permukaan menjadi faktor penting yaitu adanya bekas hasil permesinan yang dapat menyebabkan permukaan hasil permesinannya kasar, sehingga untuk membuat permukaan halus harus melakukan proses tahapan akhir yang lumayan lama. Tingkat kekasaran permukaan kayu merupakan standar utama dalam proses permesinan di industri furniture dan salah satu indeks untuk mengukur kualitas suatu produk furniture.

Kekasaran merupakan salah satu karakteristik permukaan di mana, dengan bantuan alat pembesar, terlihat bahwa permukaan sebenarnya tidak sehalus yang terlihat oleh mata secara langsung. Ini adalah ketidakaturan dalam konfigurasi permukaan suatu benda atau bidang (Yudo dan Kurniawan, 2018). Kekasaran permukaan merupakan salah satu jenis penyimpangan yang dapat terjadi akibat kondisi benda kerja dan proses permesinan. Oleh karena itu, untuk mendapatkan produk yang berkualitas tinggi dengan tingkat presisi yang optimal dan kekasaran permukaan yang baik, diperlukan penerapan proses permesinan yang tepat dan sesuai (Yanuar *et al.*, 2014).

Menurut Eltahwani *et al.* (2011), dalam proses pelaseran, kekasaran hasil pemotongan berkurang seiring dengan meningkatnya posisi titik fokus dan daya laser. Selain itu kekasarannya akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan potong dan tekanan udara (Panggabean *et al.*, 2023). *Surface Roughness Tester* adalah sebuah alat yang digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan. Kekasaran permukaan dapat dijelaskan sebagai ketidakaturan bentuk yang terjadi selama proses produksi akibat pengerjaan mesin. Nilai kekasaran sering dinyatakan dalam satuan *Roughness Average* (Ra), yang merupakan parameter kekasaran yang paling umum digunakan secara internasional. Ra adalah rata-rata aritmatika dari penyimpangan profil kekasaran permukaan dari garis tengah rata-rata (Laksono, 2016).

Pemotongan dengan laser juga mempengaruhi lebar maupun kedalaman garitan pada pemotongan kayu. Badoniya (2014) menyatakan bahwa untuk efisiensi maksimum, kombinasi yang tepat antara kecepatan pemotongan dan daya laser

akan bergantung pada ketebalan benda kerja, kepadatan dan lebar garitan yang diinginkan. Selain itu, diperlukan tenaga yang lebih besar untuk memotong kayu basah dibandingkan dengan yang dibutuhkan untuk kayu kering jika kecepatan pemotongan dijaga konstan.

Garitan merupakan karakteristik penting dari pemotongan laser. Hal ini menjamin keuntungan dibandingkan proses pemotongan kontur lainnya. Profil garitan dengan pemotongan laser berbentuk lancip. Pemotongan laser menghasilkan pemotongan yang sempit, akurat dan tepat serta menghasilkan ujung-ujung yang lurus dan tajam. Hal ini menjadikan pemotongan laser dapat mengurangi bahan yang terbuang akibat pemotongan. Lebar potongan berkurang dengan meningkatnya kecepatan. Selain itu peningkatan kepadatan kayu menyebabkan lebar pemotongan berkurang (Petru dan Lunguleasa 2014).

Salah satu faktor utama yang memengaruhi sifat kayu dan proses pengolahannya adalah sifat kimia. Sifat-sifat kimia tersebut meliputi warna, daya tahan terhadap berbagai kondisi, kekuatan perekatan serat kayu, kemudahan pengerjaan, kekuatan kayu, dan aspek-aspek lainnya. Sifat warna khususnya menjadi fokus perhatian karena dapat secara signifikan meningkatkan nilai ekonomis produk kayu yang dihasilkan (Lukmandaru *et al.*, 2015; Zulkahfi *et al.*, 2020). Secara alami, kayu memiliki struktur selulosa yang terdiri dari gugusan grup hidroksil khromoforik aromatik yang mampu menyerap energi cahaya. Ketika terkena radiasi sinar matahari, energi cahaya ini dapat menyebabkan reaksi kimia seperti delignifikasi dan pelunturan zat warna pada kayu (Krisdianto *et al.*, 2018).

Prinsip kerja laser dapat memengaruhi tingkat warna pada permukaan kayu komposit. Proses pembakaran oleh sinar laser dapat menyebabkan perubahan kecerahan warna pada papan komposit tersebut. Tujuan dari pengelompokan menggunakan segmentasi ruang warna $L^*a^*b^*$ (CIELAB) adalah untuk mengidentifikasi kandungan warna secara digital. Ruang warna CIELAB menggambarkan warna sebagai tiga nilai numerik: L^* untuk tingkat kecerahan, serta a^* dan b^* untuk komponen warna hijau-merah dan biru-kuning. Identitas suatu warna ditentukan oleh panjang gelombang cahaya. Panjang gelombang

warna yang masih dapat ditangkap oleh mata manusia berkisar antara 380 hingga 780 nanometer (Sinaga, 2019). Penentuan tingkat perubahan warna yang terjadi pada permukaan papan komposit dapat digunakan dengan uji CIE-LAB. Sistem CIE-LAB merupakan model tiga dimensi, hanya dapat dibaca dan digambarkan dalam ruang tiga dimensi, pengukuran warna menggunakan metode CIE-LAB jauh lebih cepat dan cukup akurat (Sinaga, 2019).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Agustus-September 2023. Kegiatan utama penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Penelitian untuk pengujian mikroskop dilakukan di Laboratorium Ilmu Hama Tumbuhan, Jurusan Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Penelitian untuk pengujian kekasaran dilakukan di Laboratorium Metrologi Industri, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin laser CO₂ dengan daya maksimum 50 Watt, mikroskop stereo, kaliper digital dengan ketelitian 0,001 mm, *software* Design Expert 13 dan *software* Corel Laser DRW X7. Sedangkan bahan yang digunakan ialah papan kayu lapis dengan ketebalan 12 mm.

3.3. Rancangan Penelitian

Metode pada penelitian ini adalah metode eksperimen skala laboratorium. Penelitian ini menggunakan *Response Surface Methodology*. Penelitian ini mengukur hasil kedalaman garitan, dan lebar garitan. Pengukuran kedalaman garitan dan lebar garitan dilakukan menggunakan mikroskop stereo. Faktor yang digunakan pada penelitian ini adalah intensitas daya power sinar laser dan

kecepatan laser. Daya yang digunakan pada penelitian ini yaitu 30 Watt, 35 Watt, 40 Watt, 45 Watt dan 50 Watt dengan variabel kecepatan 2 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s dan 8 mm/s.

3.4. Prosedur Penelitian

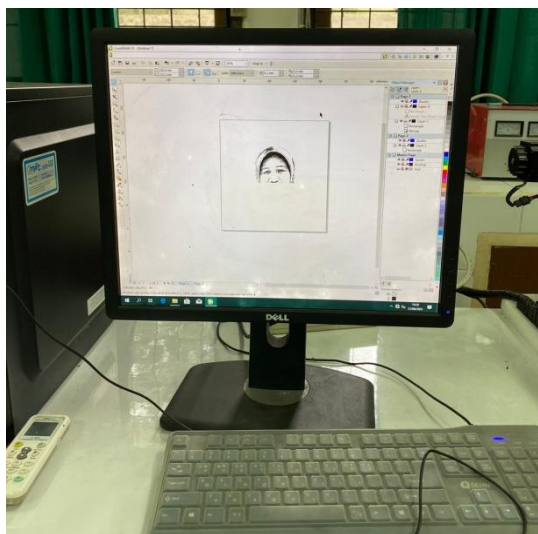
3.4.1. Persiapan dan Pengaturan Mesin Laser CO₂

Persiapan alat diawali dengan pengaturan hardware berupa mesin laser CO₂CNC LS-6040 50 Watt (Gambar 2) meliputi pipa asap, kipas pembuangan asap, pompa air, kabel daya, kabel *ground*, kabel port paralel dan kunci USB dipasang pada mesin laser. Pipa asap dan kipas pembuangan asap digunakan sebagai pengatur sirkulasi keluar masuknya udara ke dalam mesin laser. Pompa air digunakan untuk mengalirkan air keluar masuk ke dalam mesin laser sebagai pendingin mesin laser. Kabel daya digunakan sebagai penghubung mesin laser dengan sumber tegangan. Kabel *ground* digunakan sebagai komputer *grounding* pada mesin laser yang menghubungkan mesin laser dengan *ground*. kabel port paralel digunakan sebagai penghubung antara mesin laser dengan komputer sebagai pengendali mesin laser melalui *software*.

Penelitian ini digunakan *software* yaitu Corel Laser DRW X7 (Gambar 3). Software ini merupakan software yang dapat digunakan untuk pengoperasian mesin laser. Dari software ini akan dibuat pola yang akan dikerjakan serta dipilih proses yang akan dikerjakan. *Software* ini juga sudah dapat digunakan untuk harus yang membuka beberapa ekstensi file. Pada saat penggunaan *software* ini diperhatikan adalah pada *Engraving machine properties*, yaitu Device ID yang harus diisi sesuai dengan Device ID mesin laser yang digunakan. Setelah selesai penginstalan hardware dan software, dipastikan mesin laser sudah terhubung dengan komputer, maka mesin laser ini siap dioperasikan.



Gambar 2. Mesin laser CO₂CNC LS-6040 50 Watt.



Gambar 3. Corel Laser DRW X7.

3.4.2. Perancangan Desain Percobaan

Sebelum dilakukan proses pelaseran, terlebih dahulu menentukan parameter intensitas daya dan kecepatan yang ingin digunakan dalam melakukan pelaseran. Selanjutnya, ditentukan batas bawah dan batas atas dari kedua faktor tersebut yaitu untuk intensitas daya digunakan batas bawah 25 Watt dan batas atas 100 Watt. Sedangkan untuk kecepatan 2 mm/s sebagai batas bawah dan 8 mm/s sebagai batas atas. Setelah menetapkan batas bawah dan batas atas dari faktor tersebut, dilakukan pembuatan desain percobaan menggunakan *software* Design Expert.

Berdasarkan Gambar 4 diketahui bahwa kolom *numeric factor* ditentukan berdasarkan jumlah variabel, pada penelitian ini digunakan dua variabel yaitu suhu dan waktu. Kolom *name* merupakan jenis variabel yaitu intensitas daya (%) dan kecepatan (mm/s). Kolom *low* dan *high* merupakan batas bawah dan batas atas dari variabel. Setelah selesai menginput data yang diperlukan klik *next*.

Central Composite Design

Each numeric factor is set to 5 levels: plus and minus alpha (axial points), plus and minus 1 (factorial points) and the center point. If categorical factors are added, the central composite design will be duplicated for every combination of the categorical factor levels.

Numeric factors: 2 (2 to 50) ☒ Horizontal ☒ Enter factor ranges in terms of ± 1 levels

Categorical factors: 0 (0 to 10) ☐ Vertical ☐ Enter factor ranges in terms of alphas

	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A [Numeric]	Daya Laser	Watt	35	50	31.8934	53.1066
B [Numeric]	Kecepatan	mm/s	2	8	0.757359	9.24264

Type: Full Blocks: 1

Points
Non-center points: 8
Center points: 5
alpha = 1.41421 Options... 13 Runs

Gambar 4. Desain Percobaan pada *Software Design Expert* 13.

Setelah itu kolom *responses* ditentukan berdasarkan jumlah respon yang ingin dilakukan setelah melakukan pelaseran. Kolom *name* pada gambar 5 merupakan jenis respon yang ingin dilakukan, sementara kolom *units* merupakan satuan dari respon tersebut.

Central Composite Design

Responses: 4 (1 to 999) ☒ Horizontal ☐ Vertical

	Name	Units
	Lebar	mm
	Kedalaman	mm
	Delta E	
	Kekasaran	um

Gambar 5. Pengisian Respon dalam Desain Percobaan.

Setelah selesai menginput data yang diperlukan klik *finish* hingga muncul tabel data awal. Software akan memberikan rekomendasi penggunaan Intensitas daya

laser dan kecepatan yang akan digunakan dalam proses pelaseran. Penelitian ini menggunakan kombinasi intensitas daya 30 Watt, 35 Watt, 40 Watt, 45 Watt, dan 50 Watt dengan kecepatan 2 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s dan 8 mm/s dapat dilihat pada Gambar 6.

	Std	Run	Factor 1 A:Daya Laser Watt	Factor 2 B:Kecepatan mm/s	Response 1 Lebar mm	Response 2 Kedalaman mm	Response 3 Delta E	Response 4 Kekasaran μm
	3	1	35	8				
	1	2	30	4				
	10	3	45	8				
	6	4	40	6				
	9	5	40	8				
	4	6	45	2				
	7	7	30	2				
	5	8	35	6				
	12	9	50	2				
	8	10	50	4				
	2	11	30	6				
	13	12	40	2				
	11	13	35	4				

Gambar 6. Tabel Data Awal.

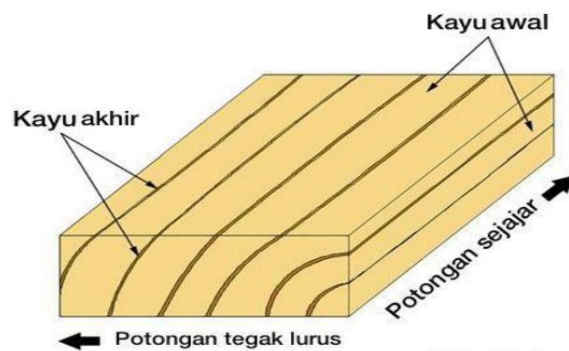
Penginputan data *response* dilakukan setelah melakukan pelaseran dengan menggunakan kombinasi intensitas daya dan kecepatan yang telah ditentukan pada tabel data awal.

3.4.3. Persiapan Kayu Lapis

Papan kayu lapis 12 mm yang digunakan masing masing berjumlah tiga buah dengan presentase yang digunakan yaitu 30 Watt, 35 Watt, 40 Watt, 45 Watt dan 50 Watt serta variabel kecepatan 2 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s dan 8 mm/s untuk pemotongan laser CO₂ di setiap pengulangan di lembar yang sama untuk mengetahui perbandingan atau variasi dari tiap variabel yang digunakan. Sebelumnya dilakukan pengamplasan pada papan kayu lapis agar mendapatkan permukaan yang halus dan tingkat kedataran yang seragam.

3.5.Mekanisme Pelaseran Papan Kayu Lapis Sengon

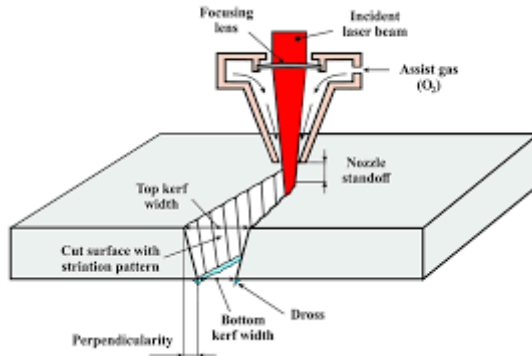
Papan kayu lapis dilaser dengan gelombang kontinu 50W CO₂ mesin pemotong laser dengan panjanggelombang 10,63 m dan lensa pemfokusan dengan panjang fokus 63,5 mm digunakan dalam eksperimen pemotongan laser. Diameter ukuran titik laser yang digunakan selama pemotongan adalah 0,1 mm. Untuk menghilangkan debu karbon dan asap knalpot dari area pemotongan, udara terkompresi adalah disuplai oleh *nozzle 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, titik laser difokuskan ke permukaan sampel dengan menyesuaikan geseran alat pengangkat untuk mengubah jarak kebuntuan nosel. Jarak *nozzle* diatur menjadi 10 mm. Arah pemotongan dilakukan secara tegak lurus dan sejajar terhadap arah serat seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema Arah Pemotongan Laser.

3.6. Pengujian Kedalaman dan Lebar Garitan

Pengukuran kedalaman garitan dan lebar garitan menggunakan mikroskop stereo. Masing- masing variabel pengulangan pada kayu lapis dengan total keseluruhan sampel 13 buah. Metode yang digunakan untuk mengukur dimensi kedalaman garitan dan lebar garitan digambarkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Metode yang digunakan untuk Mengukur Dimensi Kedalaman Garitan dan Lebar Garitan.

3.7. Pengujian Perubahan Warna

Pengujian warna terhadap kayu sengon dilakukan sebelum dan setelah di pengukiran laser dengan menggunakan alat Colorimeter Amtast AMT507 seperti pada Gambar 5. Perubahan warna ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔE^* dapat dihitung dengan persamaan penilaian perubahan warna menggunakan sistem CIE-Lab untuk mengukur tingkat kecerahan (L^*), kromatisitas merah/hijau (a^*), dan kromatisitas kuning/biru (b^*) dari parameter warna (Afkar *et al.*, 2022; Rahman *et al.*, 2022) . Perubahan warna ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔE^* dapat dihitung dengan rumus berikut:

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

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

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

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

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 pengukuran

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

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

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

Δb^* = Perbedaan antara nilai b^* sebelum dan sesudah pengukuran

ΔE^* = Perubahan warna akibat sebelum dan sesudah pengukuran

Tingkat kecerahan (L^*) dinyatakan nilainya antara 0 (hitam) sampai dengan 100 (putih). Nilai a^* menyatakan warna kromatik campuran merah hijau dengan nilai a (positif) dari 0 sampai dengan 120 untuk warna merah, $-a$ (negatif) dari 0 sampai dengan -120 untuk warna hijau. Nilai b^* menyatakan warna kromatik campuran biru-kuning dengan nilai b (positif) dari 0 sampai dengan 120 untuk warna kuning dan nilai $-b$ (negatif) dari 0 sampai dengan -120 untuk warna biru (Hidayat *et al.*, 2017b; Rubiyanti *et al.*, 2019; Mauritio *et al.*, 2023). Perubahan warna dapat dinilai dari derajat perubahan warna menurut klasifikasi pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Perubahan Warna.

Nilai Klasifikasi	Keterangan
$0,0 < \Delta E^* \leq 0,5$	Perubahan Dapat Dihiraukan
$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$	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

Sumber: Valverde dan Moya (2014).

3.8. Uji Kekasaran Permukaan

Uji kekasaran kayu yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan alat uji *Surface Roughness Tester* (SJ-201, Mitutoyo, Kawasaki Jepang). Alat uji kekasaran permukaan digunakan untuk menguji tingkat kekasaran pada permukaan kayu lapis (*plywood*) yang telah melalui proses pemotongan menggunakan mesin laser CO₂. Proses pengujian kekasaran pada kayu lapis dilakukan sebelum dan sesudah dilakukan proses pelaseran menggunakan berbagai intensitas daya laser.

Pengukuran kekasaran permukaan diperoleh dari sinyal pergerakan stylus yang memiliki bentuk seperti berlian (*diamond*), pergerakannya sepanjang garis lurus permukaan sebagai indikator pengukur kekasaran permukaan benda uji. Prinsip pengoperasian alat *surface roughness* adalah dengan menggunakan *transducer* dan akan diolah dengan *microprocessor*. *Transducer* sendiri merupakan perangkat elektronik yang mengkonversi suatu energi menjadi bentuk energi lainnya (Abbas *et al.*, 2013).

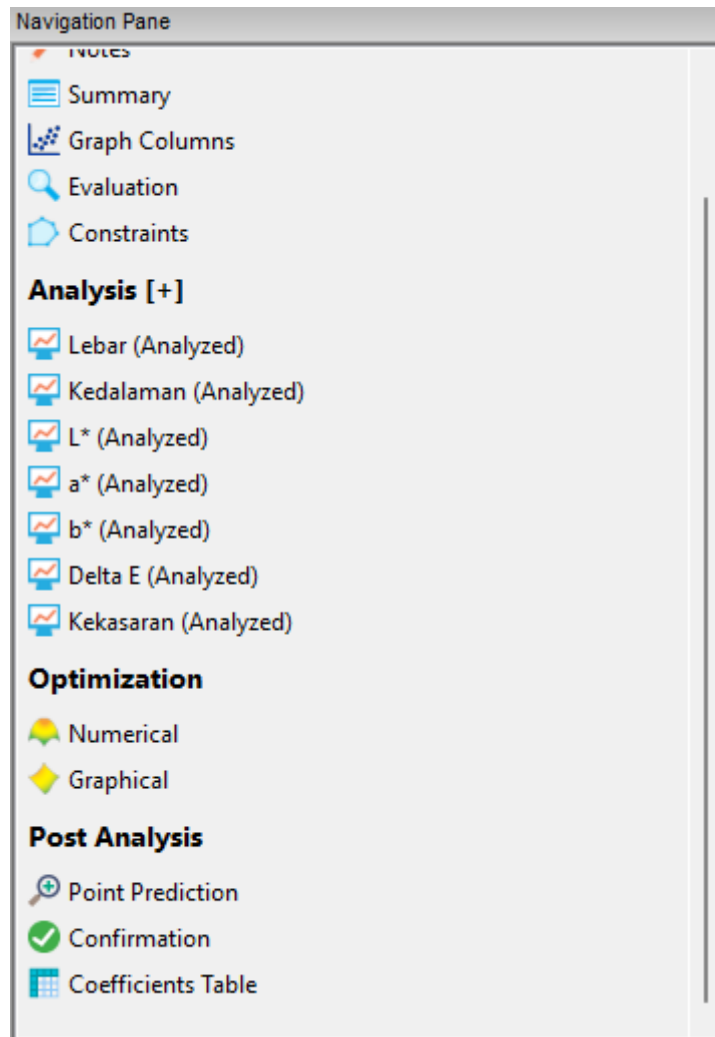
3.9. Optimasi Menggunakan RSM

Setelah melakukan pelasaran dengan kombinasi daya dan kecepatan laser, dilakukan penginputan nilai pengujian sampel pada desain percobaan yang sudah dibuat. Hasil Pengujian kemudian dimasukkan ke dalam kolom *response* sesuai dengan *name* dan *units* yang telah ditentukan.

Std	Run	Factor 1 A:Daya Laser Watt	Factor 2 B:Kecepatan mm/s	Response 1 Lebar mm	Response 2 Kedalaman mm	Response 3 L*	Response 4 a*	Response 5 b*	Response 6 Delta E	Response 7 Kekasaran µm
12	9	50	2	0,503	2,67	29,4	5,6	22,7	60,9966	1,64
8	10	50	4	0,478	2,07	30,2	5	22,4	60,1437	1,81
4	6	45	2	0,497	2,73	31,3	5,3	22,7	59,0938	2,04
10	3	45	8	0,484	1,53	31,5	5,2	22,4	58,8601	2,11
13	12	40	2	0,494	2,31	31,9	4,9	22,8	58,4901	2,77
6	4	40	6	0,481	1,55	32,2	4,7	22,5	58,1528	2,84
9	5	40	8	0,467	1,13	32,5	4,2	22,4	57,8272	2,94
7	7	30	2	0,476	1,06	32,1	4,7	23,5	57,4689	4,54
11	13	35	4	0,484	1,3	31,9	4,7	23,6	58,5721	4,69
5	8	35	6	0,472	1,16	32,2	4,3	22,7	56,8673	4,75
3	1	35	8	0,458	1,86	33,5	4	22,5	58,1299	4,87
1	2	30	4	0,465	0,681	33	4,5	22,9	55,9028	4,89
2	11	30	6	0,461	0,784	34,5	4,2	22,6	58,2453	4,92

Gambar 9. Hasil Pengujian Sampel.

Selanjutnya data dianalisis dengan menekan *analysis* (Gambar 10) dan menghasilkan model matematika tertentu. Pilih bilah alat untuk menampilkan respon dalam bentuk 3D. Respons kemudian akan dioptimalkan dengan menekan *optimization* (Gambar 10). Selanjutnya tentukan kriteria minimal, maksimal dan dalam nilai tertentu untuk menentukan kebutuhan kriteria variabel yang akan dioptimalkan. Program akan menghasilkan satu nilai optimal yang direkomendasikan.



Gambar 10. Panel Analisis Data.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah

1. Intensitas daya pada pemotongan dengan laser CO₂ terbukti mempengaruhi kualitas pemotongan kayu lapis sengon. Daya laser yang lebih besar cenderung meningkatkan nilai lebar dan kedalaman, kromatisasi merah/hijau (A*), kromatisasi kuning/biru (A*), dan nilai perubahan warna total (ΔE^*) pada pemotongan dengan laser CO₂. Sebaliknya daya laser yang lebih besar menurunkan nilai kecerahan (L*) dan menurunkan nilai kekasaran pada pemotongan dengan laser CO₂.
2. Kecepatan pada pemotongan dengan laser CO₂ terbukti mempengaruhi kualitas pemotongan kayu lapis sengon. Kecepatan potong yang lebih tinggi menurunkan nilai lebar, kedalaman, nilai kromatisasi merah/hijau (A*), nilai kromatisasi kuning/biru (B*), nilai perubahan warna total (ΔE^*). Sebaliknya kecepatan potong yang lebih tinggi meningkatkan nilai kecerahan (L*) dan meningkatkan nilai kekasaran pemotongan dengan laser CO₂.
3. Hasil optimasi pemotongan kayu lapis sengon dengan laser CO₂ menggunakan metode RSM menghasilkan kombinasi optimum pada daya laser 40 Watt dan kecepatan 8 mm/s dengan nilai *desirability* 0,51.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, saya menyarankan agar penelitian lebih lanjut pada berbagai jenis papan kayu komposit, kombinasi pelaseran dan analisis yang berbeda dari penelitian sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, M., Ma'ruf, S. D., Kaskoyo, H., Safe'i, R., dan Hidayat, W. 2020. Modifikasi Sifat Fisis dan Mekanis Kayu Sengon (*Falcataria moluccana*) dan Kelapa (*Cocos nucifera*) melalui Perlakuan Panas dengan Minyak. In *Prosiding Seminar Nasional Konservasi 2020*. 564-569. LPPM Universitas Lampung.
- Afkar, H., Febryano, I. G., Duryat, D., Suri, I. F., dan Hidayat, W. 2022. Pengaruh Perlakuan Panas Oil Heat Treatment terhadap Perubahan Warna Kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Warta Rimba: Jurnal Ilmiah Kehutanan*. 10(5): 97-104.
- Agustian, J., Hermida, L., dan Rustamaji, H. 2021. Penguasaan Perangkat Design Expert® Dalam R&D Produksi untuk Ketrampilan Mengoptimasi Operator Proses PT. Tunas Baru Lampung (TBK) Bandar Lampung. *Abdimas Singkerru*. 1(2): 124-133.
- Amany, R., Rahman, A. F., Febryano, I. G., Iswandaru, D., Suri, I. F., and Hidayat, W. 2022. Preferensi Konsumen terhadap Perubahan Warna Papan Partikel Hasil Ukir Laser CO₂. *Journal of People, Forest and Environment*. 2(2): 51-59.
- Arifin, Z., Budiarso, E., dan Winata, B. 2022. Pengawetan Kayu Sengon (*Paraserianthes falcataria* (L) Nielsen) Menggunakan Oli Bekas dengan Metode Perendaman Dingin. *ULIN: Jurnal Hutan Tropis*. 6(1): 36-48.
- Assyifa, U., Nugraha, D., Febryano, I. G., Duryat, D., dan Hidayat, W. 2023. Effect of CO₂ Laser Speed on Kerf Width and Cutting Depth of Acacia Mangium Wood. In *Prosiding Seminar Nasional Masyarakat Biodiversitas Indonesia*. 9(1): 133-136.

- Aydar, A. Y. 2018. Utilization of Response Surface Methodology in Optimization of Extraction of Plant Materials. *Statistical approaches with emphasis on design of experiments applied to chemical processes*. 157-169.
- Aziz, M., dan Saraswati, R. 2022. Optimalisasi Parameter Mesin CNC Milling 3 Axis terhadap Waktu Produksi dengan menggunakan *Response Surface Methodology*. *Formosa Journal of Applied Sciences*. 1(4): 293-304.
- Badoniya, P. 2018. CO₂ Laser Cutting of Different Materials—a Review. *Int. Res. J. Eng. Technol*. 5(6): 1-12.
- Badruzzaman, Baskoro, A.S., dan Siswantoro, A. R. 2016. Analisis Fabrikasi Desain Passive Mixing Microchannel Perangkat Mikrofluidik Material Acrylic Dengan Laser CO₂ Daya Rendah. *Jurnal Teknologi Terapan*. 2 (2): 8-14.
- Boyaci, İ. H. 2005. A New Approach for Determination of Enzyme Kinetic Constants using Response Surface Methodology. *Biochemical Engineering Journal*. 25(1): 55-62.
- BPS. 2023. *Statistik Produksi Kehutanan 2022*. Badan Pusat Statistik. Jakarta
- Braima, N., Maryam, A. N. A., dan Odejobi, O. J. 2016. Utilization of Response Surface Methodology (RSM) in the Optimization of Crude Oil Refinery. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*. 3: 4361-4369.
- Dayadi, I. 2021. Ketahanan Api Kayu Sengon (*Paraserianthes falcataria* (L.) nielsen) yang Diawetkan dengan Bahan Pengawet Boraks. *PERENNIAL*. 17(1): 19-25.
- Delima, A., Hermawan, Y., Triono, A., Sakura, R. R., Badriani, R. E., dan Hidayat, M. A. 2022. Analisis Kekasaran Permukaan dan Morfologi Chips pada Proses Drilling Kayu Jati. *STATOR: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 5(1): 18-27.
- Ding, T., Peng, W., dan Li, T. 2017. Mechanism of Color Change of Heat-Treated White Ash Wood by Means of FT-IR and XPS Analyses. *J. For. Eng*. 2 (5): 25-30.

- Eltawahni, H. A., Olabi, A. G., dan Benyounis, K. Y. 2011. Investigating the CO₂ Laser Cutting Parameters of MDF Wood Composite Material. *Optics & Laser Technology*. 43(3): 648-659.
- Eltawahni, H. A., Rossini, N. S., Dassisti, M., Alrashed, K., Aldaham, T. A., Benyounis, K. Y., dan Olabi, A. G. 2013. Evaluation and Optimization of Laser Cutting Parameters for Plywood Materials. *Optics and lasers in engineering*. 51(9): 1029-1043.
- Farooq, Z., Rehman, S., dan Abid, M. 2013. Application of Response Surface Methodology to Optimize Composite Flour for the Production and Enhanced Storability of Leavened Flat Bread (Naan). *Journal of Food Processing and Preservation*. 37: 939-94.
- Febrianto, F., Hidayat, W., Samosir, T. P., Lin, H. C., dan Soong, H. D. 2010. Effect of Strand Combination on Dimensional Stability and Mechanical Properties of Oriented Strand Board Made from Tropical Fast-Growing Tree Species. *Journal of Biological Sciences*. 10(3): 267-272.
- Guo X, Deng M, Hu Y, Wang Y, dan Ye T. 2021. Morphology, Mechanism and Kerf Variation during CO₂ Laser Cutting Pine Wood. *Journal of Manuf Process* 68 (A): 13-22.
- Hanifa, D. S., dan Dwijanto, D. 2022. Optimasi Keuntungan Produksi Olahan Salak Pondoh di Desa Wisata Pulesari dengan Metode Integer Linear Programming. *Unnes Journal of Mathematics*. 11(1): 69-79.
- Hardianto, A. H., Ma'ruf, S. D., dan Hidayat, W. 2020. Oil Heat Treatment Kayu Sengon (*Falcataria moluccana*) dan Kelapa (*Cocos nucifera*) pada Berbagai Durasi Perlakuan. In: *Seminar Nasional Konservasi 21 April 2020: Konservasi Sumberdaya Alam untuk Pembangunan Berkelanjutan*. 287–292.
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Kim, S., Lee, S., dan Yoo, J. 2021. Valorization of Indonesian Wood Wastes Through Pyrolysis: A Review. *Energies*. 14(5): 1407.
- Hidayat, I. R., Zuhrotun, A., dan Sopyan, I. 2021. Design-Expert Software Sebagai Alat Optimasi Formulasi Sediaan Farmasi. *Majalah Farmasetika*. 6(1): 99-120.

- Hidayat, W., Febrianto, F., Purusatama, B. D., dan Kim, N. 2018. Effects of Heat Treatment on the Color Change and Dimensional Stability of *Gmelina arborea* and *Melia azedarach* Woods. In *E3S Web of Conferences*. 68 (03010): 1-11. EDP Sciences.
- Hidayat, W., Kim, Y. K., Jeon, W. S., Lee, J. A., Kim, A. R., Park, S. H., Maail, R. S., dan Kim, N. H. 2017a. Qualitative and Quantitative Anatomical Characteristics of Four Tropical Wood Species from Moluccas, Indonesia. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 45(4): 369–381.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J., Park, B., Banuwa, I.S., Febrianto, F., dan Kim, N. 2017b. Color Change and Consumer Preferences Towards Color of Heat Treated Korean White Pine and Royal Paulownia Woods. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 45(2): 213-222.
- Hidayat, W., Suri, I. F., Febryano, I. G., Afkar, H., Rahmawati, L., Duryat, D., dan Kim, N. 2023. Environmentally-Friendly Wood Modification: Physical and Mechanical Properties of Jabon Wood (*Anthocephalus cadamba*) as Affected by Oil Heat Treatment. *International Journal of Heat and Technology*. 41(3): 769-774.
- Hidayat, W., Sya'bani, M. I., Purwawangsa, H., Iswanto, A. H., dan 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., dan Kesevaan, M. 2018. Parameter Optimization for CO₂ Laser Cutting of Wood Polymer Composite (WPC). In *Journal of Physics: Conference Series* (1049-1 012101. IOP Publishing.
- Imrigha, N. A. A., dan Suana, L. P. 2016. Laser Tattoo Removal Comparison Between 1064 and 532 nm of a Q-switched Nd: YAG Laser Treatment. *J Teknol*. 78(3): 199-202.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2020. *Direktorat Jenderal Pengendalian DAS dan Hutan Lindung*. Direktorat Jenderal Pengendalian DAS dan Hutan Lindung. Jakarta.

- Koç, B., dan Kaymak-Ertekin, F. 2010. Response Surface Methodology and Food Processing Applications. *GIDA-Journal of Food*. 35(1): 63-70.
- Krisnawati, H., Varis, E., Kallio, M.H., dan Kanninen, M. 2011. *Paraserianthes falcataria (L.) Nielsen: Ekologi, Silvikultur dan Produktivitas*. Center for International Forestry Research (CIFOR). Bogor.
- 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.
- Kubovský, I.; Kačík, F.; Reinprecht, L. 2016. The Impact of UV Radiation on the Change of Colour and Composition of the Surface of Lime Wood Treated with a CO₂ Laser. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* X. 322: 60–66.
- Kučerka, M.; Očkajová, A. 2018. Thermowood and Granularity of Abrasive Wood Dust. *Acta Fac. Xylologiae Zvolen*. 60: 43–51.
- Kusumaningrum, N., Ernawati, T., Fariz, N., Junianto, A. B., dan Anshory, B. J. 2022. Pemanfaatan Limbah Kayu dalam Perancangan Kursi Makan pada Perumahan Kota Podomoro Tenjo. *Ars: Jurnal Seni Rupa dan Desain*. 25(1): 59-70.
- Li, R., Guo, X., Cao, P., OuYang, J., Teng, Y., dan Wang, X. A. 2016. Optimization of Laser Cutting Parameters for Recombinant Bamboo Based on Response Surface Methodology. *Wood Research*. 61(2): 275-286.
- Li, R., Xu, W., Wang, X., dan Wang, C. 2018. Modeling and Predicting of the Color Changes of Wood Surface during CO₂ Laser Modification. *Journal of Cleaner Production*. 183: 818-823.
- Lin. C. J., Wang, Y. C., Lin, L. D., Chiou, C. R., Wang, Y. N., dan Tsai, M. J. 2008. Effects of Feed Speed Ratio and Laser Power on Engraved Depth and Color Difference of Moso bamboo lamina. *Journal of Materials Processing Technology*. 198 (1): 419- 425.
- Lobang, A., dan Nurrachmania, M. 2021. Produk Kayu Tiruan: Kayu Lapis dan Kayu Lamina. *Jurnal Akar*. 3(1): 65-71.

- Ma'ruf, S. D., Bakri, S., Febryano, I. G., Setiawan, A., Haryanto, A., Suri, I. F., and 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*. 12(1): 255-267.
- Malau, L. R. E., Anjani, R., Ulya, N. A., dan Martin, E. 2022. Competitiveness and determinants of Indonesian plywood export. *Jurnal Sylva Lestari*. 10(2): 278-293.
- 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(4): 943-966.
- Mauritio, P., Duryat, D., Riniarti, M., dan Hidayat, W. 2023. Pengaruh Variasi Suhu Torefaksi terhadap Perubahan Warna dan Sifat Fisik Pelet Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*). *Warta Rimba: Jurnal Ilmiah Kehutanan*. 10(5): 1-7.
- Nelwan, C., Kekenusa, J. S., dan Langi, Y. A. 2013. Optimasi Pendistribusian Air dengan Menggunakan Metode least Cost dan Metode Modified Distribution (Studi Kasus: PDAM Kabupaten Minahasa Utara). *Jurnal Ilmiah Sains*. 13(1): 45-51.
- Ninikas, K., Kechagias, J., dan Salonitis, K. 2021. The impact of process parameters on surface roughness and dimensional accuracy during CO₂ laser cutting of PMMA thin sheets. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 5(3): 74.
- Nurjanah, R., dan Mustika, C. 2018. Analisis determinan ekspor kayu lapis Indonesia ke Jepang. *e-Journal Perdagangan Industri dan Moneter*. 6(3): 167-176.
- Nurjanna, N., Ekawati, D., dan Fardinah, F. 2022. Penerapan Algoritma Branch and Bound dalam Optimalisasi Produk Tenun Sa'be (Studi Kasus: Toko Sutera Mandar Kec. Campalagian). *Journal of Mathematics: Theory and Applications*. 4(1): 8-14.
- Nurkholis, A., Abidin, Z., dan Sulistiani, H. 2021. Optimasi Parameter Support Vector Machine Berbasis Algoritma Firefly Pada Data Opini Film. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*. 5(5): 904-910.

- Očkajová, A.; Kučerka, M.; Kminiak, R.; Krišťák, L'; Igaz, R.; Réh, R. 2020. Occupational Exposure to Dust Produced When Milling Thermally Modified Wood. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 17: 1478.
- Panggabean, R. M., Suri, I. F., Febryano, I. G., Iswandaru, D., dan Hidayat, W. 2023. Pengaruh Daya Laser Co₂ Terhadap Tingkat Kekasaran Permukaan Dan Perubahan Warna Kayu Pinus (*Pinus Merkusii*). *Seminar Nasional Konservasi*. 296-303.
- Patel, D. K., dan Patel, D. M. 2014. Analysis the Effect of Laser Engraving Process for Surface Roughness Measurement on Stainless Steel (304). *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*. 4(3): 725-730.
- Petru, A., & Lunguleasa, A. 2014. Wood Processing By Laser Tools. *International Scientific Committee*, 213.
- Prihadianto, B. D., dan Nugroho, G. 2018. Pengaruh Jarak Laser Head terhadap Diameter Spot pada Pemotongan Polymethyl Methacrylate menggunakan Mesin Laser Cutting. *Jurnal Infotekmesin*. 9(1): 42-49.
- Pritam, A. 2016. Experimental investigation of laser deep engraving process for AISI 1045 stainless steel by fiber laser. *International Journal of Information Research and Review*. 3(1): 1730-1734,
- Priyanto, A., Hantarum, H., dan Sudarno, S. 2018. Pengaruh Variasi Ukuran Partikel Briket Terhadap Kerapatan, Kadar Air, dan Laju Pembakaran pada Briket Kayu Sengon. In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*. 541-546.
- Purba, S. D., dan Ahyaningsih, F. 2020. Integer Programming Dengan Metode *Branch and Bound* dalam Optimasi Jumlah Produksi Setiap Jenis Roti Pada PT. Arma Anugerah Abadi. *Jurnal Karismatika*. 6(3): 20-29.
- Rafik, A., dan Cahyani, R. F. 2017. Tinjauan Perbandingan Biaya Penggunaan Bekisting Kolom Kayu, Plywood dan Sistem Peri (PERI LICO). *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*. 1(1): 9-17.

- Rafly, N. M., Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., Wijaya, B. A., Niswati, A., Hasanudin, U., dan Banuwa, I. S. 2022. Pengaruh Pemberian Biochar Tandan Kosong Kelapa Sawit terhadap Pertumbuhan Sengon (*Falcataria moluccana*). *Journal of Tropical Upland Resources*. 4(1): 1-10.
- Rahman, A. F., Amany, R., Suri, I. F., Febryano, I. G., Duryat, D., dan Hidayat, W. 2022. 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.
- Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Yoo, J., Kim, S., dan Lee, S. 2021. Using Two Dosages of Biochar from *Shorea* to Improve The Growth of *Paraserianthes falcataria* Seedlings. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 749(1): 012049.
- Rizky, T., Fikri, A., dan Nasuha, C. N. 2022. Kekuatan Tarik Plywood dari Bahan Sengon (*Albizia chinensis*). *Jurnal Fakultas Teknik Kuningan*. 3(2): 65-70.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Bakri, S. 2019. Karakteristik pellet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reactor counter-flow multi baffle (COMB). *Jurnal Sylva Lestari*. 7(3): 321-331.
- Samarya, Y. T., Sulianti, M. M., Perangin-angin, B., dan Marhaposan, S. 2013. Aplikasi Laser Co₂ untuk Pemotongan (*Cutting*) Material Menggunakan Mesin CNC (*Control Numeric Computer*). *Saintia Fisika*. 5 (1).
- Saputra, B., Tambunan, K. G. A., Suri, I. F., Febryano, I. G., Iswandar, D., dan Hidayat, W. 2022. Effects of Torrefaction Temperature on the Characteristics of Betung (*Dendrocalamus asper*) Bamboo Pellets. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 11(2): 339-353.
- Sari, K. R., dan Widyastutik, W. 2015. Faktor yang Mempengaruhi dan Estimasi Tarif Ekuivalen NTBs Ekspor Kayu Lapis Indonesia. *Buletin Ilmiah Litbang Perdagangan*. 9(1): 95-108.
- Sari, S. N., Kaban, R., Khaliq, A., dan Andari, A. 2022. Sistem Penjadwalan Mata Pelajaran Sekolah Menggunakan Metode Hybrid Artificial Bee Colony (HABC). *Jurnal Nasional Teknologi Komputer*. 2(1): 20-32.

- Saro, F. S., Sompie, S. R., dan Allo, E. K. 2018. Rancang Bangun Alat Simulasi Latihan Menembak Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*. 7(3): 251-258.
- Septianingrum, A., dan Wibisono, S. 2023. Pemeringkatan Supplier Kayu Lapis Menggunakan Metode Hibrid AHP-COPRAS. *Pixel: Jurnal Ilmiah Komputer Grafis*. 16(1): 74-84.
- Sinaga, A. S. 2019. Segmentasi Ruang Warna L^*a^*b . *Jurnal Mantik Penusa*. 3(1): 43–46.
- Somadona, S., Sribudiani, E., dan Arlita, T. 2016. Pengujian Kualitas Kayu Lapis untuk Kontruksi Bangunan yang Beredar di Pasaran Kota Bengkalis. *Wahana Forestra: Jurnal Kehutanan*. 11(2) : 154-165.
- 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. *JFA Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 14(3): 78-83.
- Suharto, I., dan Saputra, M. P. D. E. 2021. *Monograf Prototipe Mesin Cnc Laser Gas CO₂-40 Watt untuk Pembuatan Produk kreatif*. Bintang Pustaka Madani. Sleman.
- Sulistio, Y., Febryano, I. G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., dan Hidayat, W. 2020. Pengaruh Torefaksi dengan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB) dan Electric Furnace terhadap Pelet Kayu Jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Jurnal Sylva Lestari*. 8(1): 65-76.
- Suwirmayanti, N. L. G. P. 2018. Aplikasi Optimasi Produksi Menggunakan Metode Simpleks Berbasis WEB. *Techno. Com*. 17(1): 61-69.
- Syahril, S., Sribudiani, E., dan Somadona, S. 2022. Efektivitas Pengawetan Kayu Sengon (*Paraserianthes falcataria*) menggunakan Ekstrak Biji Mahoni dengan Metode Rendaman Dingin Terhadap Serangan Rayap Tanah. *Journal of Forest Science Avicennia*. 5(2): 159-167.
- Tambunan, K. G. A., Saputra, B., Suri, I. F., Febryano, I. G., Bintoro, A., dan Hidayat, W. 2023. Perubahan Sifat Fisis dan Mekanis Pelet Bambu Andong

(*Gigantochloa pseudoarundinaceae*) setelah Perlakuan Torefaksi. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 17(1): 11-20.

Tarigan, A. A. L. B., Riniarti, M., Prasetya, H., Hidayat, W., Niswati, A., Banuwa, I. S., dan 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.

Utama, R. C., Febryano, I. G., Herwanti, S., dan Hidayat, W. 2019. Saluran Pemasaran Kayu Gergajian Sengon (*Falcataria moluccana*) pada Industri Penggajian Kayu Rakyat di Desa Sukamarga, Kecamatan Abung Tinggi, Kabupaten Lampung Utara. *Jurnal Sylva Lestari*. 7(2): 195–203.

Utami, M. P., Lubis, M. A. R., Asmara, S., Bakri, S., Hidayati, S., dan Hidayat, W. 2023. Characteristics of Eco-Friendly and Sustainable Plywood Adhesive derived from Low-Quality Cat's Eye Damar Resin. *Jurnal Sylva Lestari*. 11(3): 514-526.

Wijaya, B. A., Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Kim, S., Lee, S., dan 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.

Wijaya, B. A., Riniarti, M., Prasetya, H., Hidayat, W., Niswati, A., Hasanudin, U., dan Banuwa, I. S. 2021. Interaksi Perlakuan Dosis dan Suhu Pirolisis Pembuatan Biochar Kayu Meranti (*Shorea* spp.) Mempengaruhi Kecepatan Tumbuh Sengon (*Paraserianthes moluccana*). *ULIN: Jurnal Hutan Tropis*. 5(2): 78-89.

Yunita, R. S., Riniarti, M., Hidayat, W., Niswati, A., Prasetya, H., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Yunita, E., dan 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.

Yusoff, N., Ismail, S. R., Mamat, A., dan Ahmad-Yazid, A. 2008. Selected Malaysian Wood CO₂-Laser Cutting Parameters and Cut Quality. *American Journal of Applied Sciences*. 5(8): 990-996.