

**PENGARUH DAYA LASER CO₂ TERHADAP TINGKAT KEKASARAN
PERMUKAAN DAN PERUBAHAN WARNA
KAYU JATI (*Tectona grandis*) DAN KAYU PINUS (*Pinus merkusii*)**

Skripsi

Oleh:

Rahel Monica Panggabean



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

**PENGARUH DAYA LASER CO₂ TERHADAP TINGKAT KEKASARAN
PERMUKAAN DAN PERUBAHAN WARNA
KAYU JATI (*Tectona grandis*) DAN KAYU PINUS (*Pinus merkusii*)**

Oleh

Rahel Monica Panggabean

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

PENGARUH DAYA LASER CO₂ TERHADAP TINGKAT KEKASARAN PERMUKAAN DAN PERUBAHAN WARNA KAYU JATI (*Tectona grandis*) DAN KAYU PINUS (*Pinus merkusii*)

Oleh

RAHEL MONICA PANGGABEAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil dari kekasaran permukaan kayu dan perubahan warna pada produk hasil laser CO₂ terhadap parameter kekuatan laser pada mesin laser CO₂ yang dapat mempengaruhi kualitas ukiran kayu dalam dunia industri dan melihat preferensi konsumen terhadap produk tersebut yang paling disukai di kalangan mahasiswa Universitas Lampung. Kayu jati (*Tectona grandis*) dan kayu pinus (*Pinus merkusii*) diberi perlakuan dengan dioven selama 24 jam dimana telah ditemukan hasil kadar air dan kerapatan kayu yang diteliti, kemudian dilaser untuk mengetahui kasar permukaan dan perubahan warna pada kayu yang diteliti. Kekuatan laser yang digunakan untuk penelitian iniyaitu 5% (2,5 watt), 10% (5 watt), 15% (7,5 watt), 20% (10 watt), 25% (12,5 watt). Karakteristik yang diamati meliputi sifat fisis (kadar air, kerapatan, warna, kekasaran, dan mikroskopis), dan preferensi konsumen. Kadar air dan kerapatan berkurang dengan meningkatnya suhu oven yang digunakan. Nilai kekasaran permukaan kayu jati dan pinus menunjukkan terjadinya perubahan kekasaran yang semakin lama semakin tinggi seiring dengan kekuatan laser yang digunakan semakin besar. Nilai (ΔE^*) lebih dari 12 menunjukkan warna papan kayu jati dan kayu pinus hasil penggrafiran berubah total. Lebar penggrafiran pada kedua kayu mengalami kenaikan dengan naiknya kekuatan laser itu sendiri. Responden telah memilih 25% (12,5 watt) sebagai hasil penggrafiran yang disukai di kedua kayu.

Kata kunci: kayu jati, kayu pinus, kekuatan laser, dan mesin laser CO₂

ABSTRACT

EFFECT OF CO₂ LASER POWER ON SURFACE ROUGHNESS AND DISCOLORATION OF TEAK WOOD (*Tectona grandis*) AND PINE WOOD (*Pinus merkusii*)

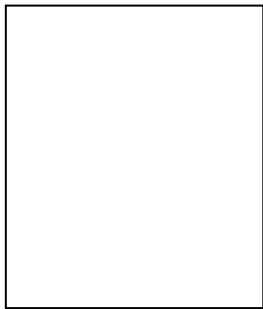
BY

RAHEL MONICA PANGGABEAN

*This study aims to determine the results of wood surface roughness and color changes in CO₂ laser products on the parameters of laser power on CO₂ laser machines that can affect the quality of wood carving in the industrial world and see consumer preferences for these products which are the most preferred among students at the University of Lampung. Teak wood (*Tectona grandis*) and pine wood (*Pinus merkusii*) were treated with an oven for 24 hours where the results of the moisture content and density of the studied wood were found, then lasered to determine surface roughness and discoloration of the studied wood. The laser power used for this research is 5% (2.5 Watts), 10% (5Watts), 15% (7.5 Watts), 20% (10 Watts), 25% (12.5 Watts). The observed characteristics included physical properties (moisture content, density, color, roughness, and microscopy), and consumer preferences. Moisture content and density decrease with increasing oven temperature used. The surface roughness value of teak and pine shows a change in roughness which is getting higher and higher as the laser power used is getting bigger. A value (ΔE^*) of more than 12 indicates the color of the engraved teak and pine wood boards has changed completely. The width of the engraving on the two wood increases with the increase in the power of the laser itself. Respondents have chosen 25% (12.5 watts) as their preferred engraving result in both wood.*

Keywords: teak wood, pine wood, laser power, and CO₂ laser engraving

RIWAYAT HIDUP



Rahel Monica Panggabean lahir di Bogor, 30 Juni 2000. Penulis merupakan putri terakhir dari tiga bersaudara, dari Bapak Natal Panggabean dan Ibu NurmiMeri Kristina Silalahi. Pendidikan yang telah ditempuh penulis meliputi TK Regina Pacis 2005-2006, SD Regina Pacis 2006-2012, SMP Budi Mulia 2012-2015, dan SMAN 6 Bogor 2015-

2018. Program Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) tahun 2018 menghantarkan penulis menjadi mahasiswi di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

Penulis aktif dalam beberapa organisasi yaitu Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) tahun 2019-2021 sebagai Anggota Departemen Internal, tahun 2021/2022 sebagai Sekretaris Departemen Internal, Himpunan Mahasiswa Jurusan Kehutanan (Himasyulva) tahun 2020/2021 menjadi Sekretaris Bidang Rumah Tangga, tahun 2021/2022 sebagai Anggota Bidang Rumah Tangga. Selama perkuliahan berlangsung, penulis pernah menjadi Asisten Praktikum mata kuliah Manajemen Hutan semester ganjil 2020/2021 dan semester genap 2020/2021, serta mata kuliah Kewirausahaan semester genap 2020/2021. Penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) tahun 2021 di Kecamatan Kalirejo, Kabupaten Lampung Tengah serta Praktik Umum selama 20 hari di Taman Nasional Way Kambas tahun 2021.

***Terkhusus kedua orang tua yang kukasihi dan kusayangi, Papa Natal
Panggabean dan Mama Nurmimeri Kristina Silalahi dan untuk
Keluargaku tercinta***

SANWACANA

Puji syukur atas berkat dan anugerah Tuhan Yesus Kristus sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Pengaruh Daya Laser CO₂ Terhadap Tingkat Kekasaran Permukaan dan Perubahan Warna Kayu Jati (*Tectona Grandis*) dan Kayu Pinus (*Pinus Merkusii*)”.

Penulis dapat menyelesaikan penelitian serta skripsi atas bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Irwan Sukri Banuwa, M.Si. selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung dan pembahas atas dukungan maupun kritik dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing tunggal yang telah membimbing dengan penuh kesabaran, memberikan waktu, motivasi, gagasan serta nasihat kepada penulis hingga skripsi terselesaikan.
4. Bapak Dian Iswandar, S.Hut., M. Sc. selaku pembahas atas dukungan maupun kritik dan saran yang telah diberikan.
5. Bapak Trio Santoso, S.Hut., M. Sc. selaku pembimbing akademik atas bimbingan dan motivasi yang diberikan selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah membimbing dan mendidik penulis selama menempuh masa studi.

7. Bapa dan Mama tercinta atas doa, kasih sayang, dukungan, dan pengertian yang tiada henti diberikan kepada penulis.
8. Abang dan Kaka yang selalu memberikan doa dan dukungan kepada penulis.
9. Karina, Bagus, Alim, Rasyidah dan Wisesa selaku rekan dalam Tim Teknologi Hasil Hutan atas segala bantuan, dukungan, dan semangat yang diberikan.
10. Mba Intan Fajar Suri, S.Hut., M.Sc atas waktu, bimbingan, dan koreksian yang diberikan.
11. Eklesia, Intan, Arum, Salma, dan Melissa yang mendukung dan menemani penulis sejak awal perkuliahan hingga akhir.
12. Keluarga besar Corysl dan Himasyilva Universitas Lampung.
13. Semua pihak yang telah terlibat dalam penelitian dan penulisan skripsi.

Penulis menyadari penyusunan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna namun penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi industri perikanan terutama produk hasil mesin laser CO₂.

Bandar Lampung, Juni 2022

Rahel Monica Panggabean

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Negara kita memiliki potensi yang baik untuk menghasilkan sumber daya alam dimana Indonesia sendiri merupakan negara yang memiliki wilayah hutan yang cukup besar yaitu 120.495.702,96 ha berdasarkan hasil pemantauan Badan Pusat Statistik tahun 2019. Pada pemenuhan bahan baku kayu salah satunya berasal dari kayu rakyat, yang bisa berasal dari hutan rakyat, ladang, tegalan, kebun campuran dan sebagainya yang merupakan lahan milik rakyat. Rakyat Indonesia sendiri banyak menggunakan sumber hutan sebagai bahan produksi dimana hasil hutan yang biasanya dikelola adalah kayu. Terkhususnya industri perkayuan dimana dimanfaatkan baik untuk bahan bangunan, kebutuhan alat musik/olahraga, dan sebagai mebel (Situmorang dan Harianja, 2018

Kondisi dunia industri perkayuan juga mempunyai banyak perkembangan yang dimana pekerjaan pemotongan kayu menggunakan alat yang lebih canggih dan waktu yang dikerjakan lebih efisien. Kayu banyak digunakan karena merupakan bahan alami dan terbarukan, tersedia dengan banyak variasi, yang banyak digunakan dalam industri konstruksi, pengemasan, furnitur, lantai dan panel (Elsani *et al.*, 2017).

Bentuk kayu yang berbeda-beda mempunyai tingkat kesusahan yang berbeda pula karena struktur yang beragam (Wahyudi, 2011). Namun, dengan adanya kemajuan teknologi maka pemotongan kayu yang mempunyai struktur berbeda dapat dengan mudah dilakukan menggunakan laser (Kurniawati dan Danu, 2014). Kurun waktu yang cukup lama hingga saat ini, laser sekarang dapat menjangkau pasar tertentu seperti pemotongan laser pada interior mobil dan

pemotongan kayu dalam industri furnitur (Aulia *et al.*, 2018). Keunggulan laser *cutting* ini dapat menerima data langsung dari komputer yang kemudian secara langsung dapat terhubung ke mesin, lalu secara otomatis dapat melakukan pemotongan dan mempersingkat waktu dalam kegiatan pemotongan di dunia industri perkayuan (Mansur *et al.*, 2019).

Mesin laser CO₂ mempunyai kegunaan dalam memotong dan mengukir kayu yang dapat disesuaikan dengan desain yang diinginkan (Wardani *et al.*, 2016). Mesin laser CO₂ dapat mempermudah pengerjaan dalam mengukir dan memotong kayu. Pengukiran dan pemotongan kayu dapat dilakukan menggunakan beberapa cara dari mulai manual sampai yang dilakukan menggunakan teknologi (Ichsan *et al.*, 2020). Namun, tidak dapat dipungkiri bahwa jika beberapa kegiatan pengukiran dan pemotongan kayu yang dilakukan oleh manusia lebih rawan terjadi kesalahan.

Pengamatan pengukiran kayu menggunakan laser CO₂ dapat melihat aspek dari perubahan warna dan tingkat kekasaran permukaan kayu. Perubahan warna dan perubahan kekasaran permukaan kayu tersebut disebabkan oleh adanya pembakaran yang terjadi oleh laser CO₂ (Bonifazi *et al.*, 2015). Perubahan yang dapat terlihat langsung oleh mata setelah pembakaran ataupun adanya perlakuan panas pada kayu adalah menurunnya tingkat kecerahan (Hidayat *et al.*, 2018). Perbedaan perubahan warna dan tingkat kekasaran permukaan kayu yang terjadi dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu daya laser dan kecepatan laser (Wardani *et al.*, 2016). Penelitian ini memakai parameter proses daya laser CO₂ yang diharapkan hasil akhir dari penelitian ini dapat menghasilkan kualitas ukiran kayu yang bagus dan mempunyai nilai ekonomi yang tinggi.

Penelitian penggunaan laser CO₂ untuk beberapa jenis kayu sudah dilakukan di beberapa negara menggunakan kayu beech (*Fagus sylvatica*) (Wien, 2012), kayu abu Eropa (*Fraxinus excelsior*) (DIN, 2003), dan cemara (*Picea abies*) (DIN, 2003). Gurau dan Petru (2018) meneliti kualitas pengukiran dengan laser CO₂ terhadap kayu maple Norwegia (*Acer platanoides*). Maple sendiri

merupakan bahan yang umum digunakan untuk mengukir dengan laser karena warnanya yang terang dan seragam. Penelitian tersebut mengamati pengaruh variasi daya laser terhadap morfologi dan kekasaran permukaan kayu setelah pengukiran dengan laser. Kesimpulan dari penelitian ini menyatakan bahwa setiap parameter yang diuji berpengaruh terhadap hasil laser, variasi parameter kekasaran dengan daya laser memiliki kecenderungan linier, dan efek laser pada kayu cenderung terhalang oleh ketidakaturan anatomi kayu (Gurau dan Petru, 2018).

Penelitian menggunakan laser CO₂ untuk kayu masih minim dilakukan di Indonesia. Penggunaan kayu untuk diproduksi lebih lanjut menggunakan laser CO₂ masih belum banyak ditemukan (Azhar, 2014). Penelitian ini ingin mengetahui bagaimana proses laser CO₂ saat mengukir sampel pada kayu keras dan kayu lunak. Jenis kayu keras yang diambil untuk dijadikan sampel yaitu kayu jati (*Tectona grandis*), sedangkan dari kayu lunak berasal dari kayu pinus (*Pinus merkusii*). Dua jenis kayu ini memiliki ciri khasnya masing-masing dimana keduanya mempunyai potensi yang besar untuk dijadikan bahan industri oleh masyarakat (Hadjib, 2009). Struktur sel kayu jati juga lebih rapat menyebabkan kayu mempunyai berat jenis yang lebih besar dibanding kayu pinus (Purwaningsih, 2014).

Oleh karena itu, penelitian terkait pengaruh daya laser CO₂ terhadap warna dan tingkat kekasaran permukaan kayu keras dan kayu lunak penting dilakukan untuk mengetahui kondisi yang optimal untuk menghasilkan produk ukir kayu yang sesuai dengan preferensi konsumen, penelitian ini juga dilakukan karena belum adanya penelitian terkait yang membahas mengenai perubahan warna dan perubahan kekasaran permukaan kayu lunak dan kayu keras serta mengetahui bagaimana daya penggunaan laser CO₂ yang baik, agar produk kayu tersebut dapat bernilai ekonomi tinggi.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui hasil dari kekasaran permukaan kayu produk hasil laser CO₂ terhadap parameter daya laser CO₂ kayu yang dapat mempengaruhi kualitas ukiran kayu.
2. Mengetahui hasil dari perubahan warna kayu produk hasil laser CO₂ terhadap parameter daya laser CO₂ kayu yang dapat mempengaruhi kualitas ukiran kayu.
3. Menganalisis preferensi konsumen terhadap produk laser CO₂ yang paling disukai.

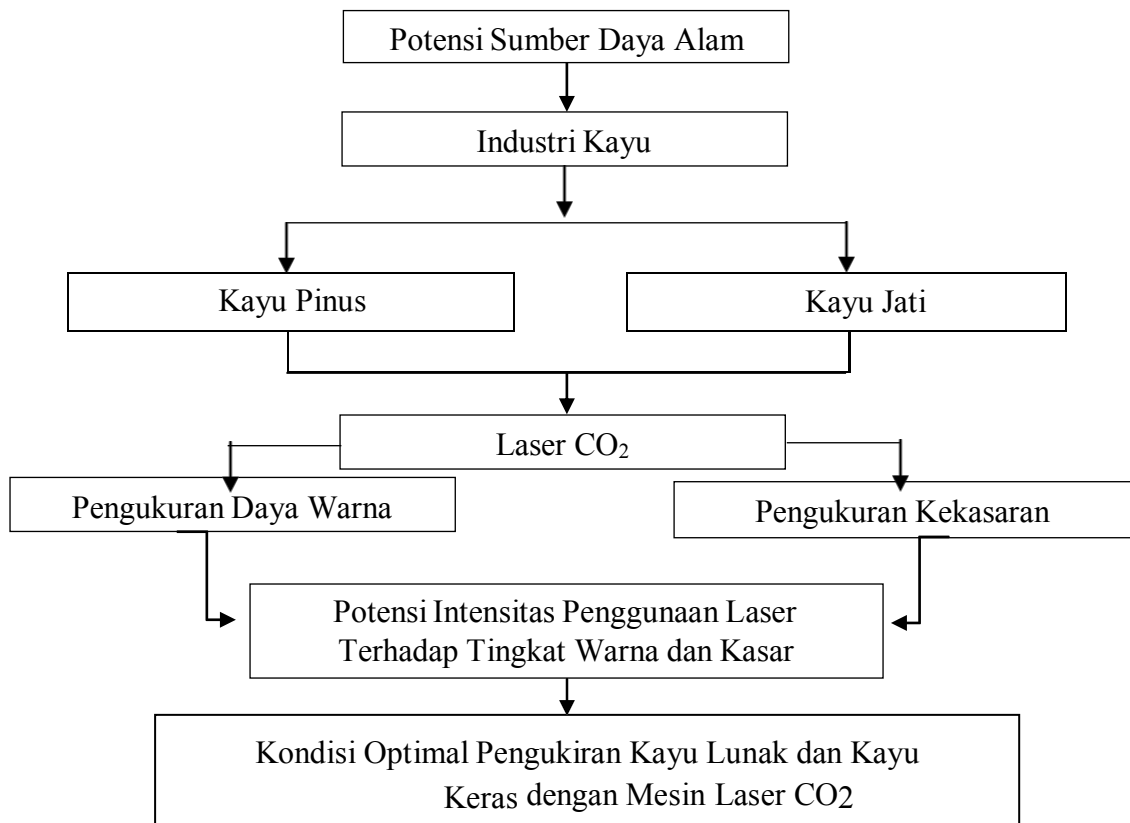
1.2. Kerangka Pikiran

Pada penelitian ini fokus yang akan diamati adalah pengaruh pengukiran kepada kayu dengan laser CO₂ terhadap perubahan warna dan tingkat kekasaran permukaan kayu. Jenis kayu yang akan diteliti merupakan sampel dari kayu lunak dan kayu keras yaitu kayu pinus (*Pinus merkusii*) dan kayu jati (*Tectona grandis*). Laser CO₂ merupakan alat yang dapat menghasilkan berkas energi berupa sinar yang dapat dikontrol dengan baik, yang jika bersentuhan dengan suatu bahan terutama kayu dapat menghasilkan panas yang cukup besar dan dapat diatur juga tingkat panasnya (Pritam, 2016).

Kayu pinus sendiri merupakan kayu yang banyak diminati oleh masyarakat umum untuk dijadikan bahan baku bidang industri maupun dalam bidang kesehatan. Seperti yang kita tahu bagian pohon pinus yang banyak digunakan ini pasti memiliki kualitas yang baik untuk diolah lebih lanjut walaupun dalam proses industri harus memilih kayu yang terbaik agar dapat bernilai tinggi (Santosa, 2010).

Kayu jati merupakan jenis kayu yang kokoh dan bernilai stabilitas dimensi yang baik, yang artinya kayunya kuat, berat sedang, dan kekasarannya relatif tinggi. Keunggulan dari kayu jati ini sendiri juga mempunyai daya tahan yang kuat dan tahan lama. Pohon jati juga mempunyai keunggulan di bidang industri

seperti yang kita ketahui dengan kekuatan dari kayu jati itu sendiri dapat dijadikan bahan kapal pada zaman bahan rumah, furniture, gazebo, dan hiasan rumah (Pudjiono, 2014). Pengukuran menggunakan laser CO₂ pada kayu pinus (*Pinus merkusii*) dan kayu jati (*Tectonagrandis*) dapat menjadi sebuah inovasi dalam dunia perindustrian. Produk olah yang dapat dibuat dari jenis kayu keras dan kayu lunak ini memiliki tujuan agar dapat mengetahui kualitas yang baik saat pengukuran agar dapat diproduksi dan mendapat nilai jual tinggi (Nurraini dan Tabba, 2012). Pada uraian yang sudah dijelaskan sebelumnya dapat dilihat kerangka penelitian yang tertera dibawah ini dan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pasokan Kayu di Indonesia

Hutan memiliki manfaat sangat besar bagi kehidupan, sumber daya hutan yang banyak dimanfaatkan manusia adalah kayu (Surasana *et al.*, 2020). Kerusakan hutan yang terjadi di Indonesia diakibatkan oleh eksploitasi hutan secara berlebihan dan tidak melakukan perbaikan kembali untuk mengatasi kerusakan hutan tersebut. Hal ini mengakibatkan produksi hasil hutan ikut menurun dan terjadi penurunan hasil kualitas hutan. Pengambilan kayu dari hutan harus memperhatikan jenis kayu dan melakukan perbaikan kembali dari hasil produksi kayu yang telah dilakukan. Secara jelas, kayu dibutuhkan untuk kehidupan sehari-hari (Alamsjah *et al.*, 2016). Kayu banyak dimanfaatkan oleh dunia industri terutama menghasilkan furnitur, semakin maju teknologi semakin dibutuhkan sesuatu hal untuk melakukan kegiatan industri kayu agar dapat lebih efektif dan efisien dalam produksinya (Nurjanah, 2020).

Kebutuhan akan penggunaan kayu semakin dibutuhkan oleh manusia dalam memenuhi keperluan hidupnya, diantaranya untuk bahan bangunan, alat rumah tangga atau alat bantu lainnya (Somashekha dan Hema, 2014). Meningkatnya jumlah penduduk mempengaruhi bertambahnya jumlah produksi kayu baik (Widiati *et al.*, 2018). Jumlah produksi kayu bulat di Indonesia pada tahun 2019 dalam Kehutanan Triwulanan mempunyai data yang menyatakan bahwa sebesar 36,17 juta m³ (62,43 %) didapatkan di Pulau Sumatera, sebesar 10,65 juta m³ (18,38 %) didapatkan di Pulau Kalimantan, sebesar 8,87 juta m³ (15,32 %) didapatkan di Pulau Jawa, 1,98 juta m³ (3,41 %) didapatkan di Pulau Maluku dan Papua, 0,18 juta m³ (0,31 persen) dihasilkan di Pulau Sulawesi, dan

sisanya sebesar 0,08 juta m³ (0,14 %) dihasilkan di Pulau Bali dan Nusa Tenggara (BPS, 2019).

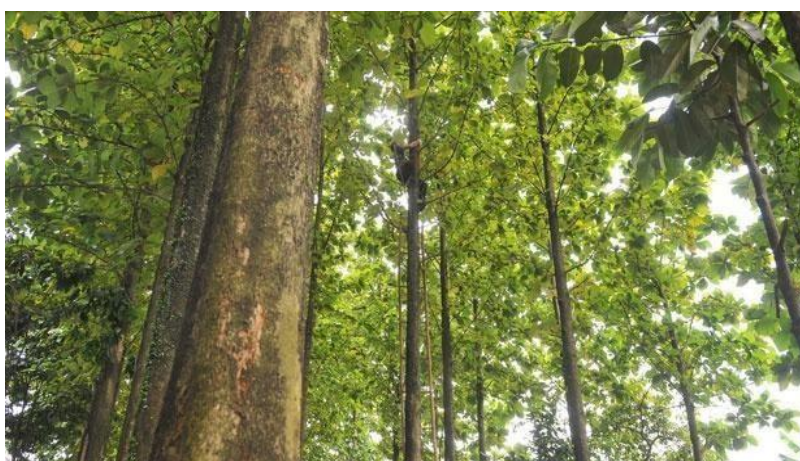
2.2. Kayu Jati (*Tectona grandis*)

Jati (*Tectona grandis*) banyak disukai karena mempunyai struktur kayu yang cukup kuat yang menjadikannya lebih awet dan memiliki kondisi kayu yang unik dan elegan (Suhardiman, 2017). Namun, semakin banyak yang menyukai jati menyebabkan penurunan ketersediaan jati dipasaran. Pengrajin semakin lama akhirnya merasa kesusahan dan menggunakan kayu jati unggul yang merupakan tumbuhan yang ditanam oleh masyarakat dan berasal dari pohon muda juga merupakan kayu cepat tumbuh (dibawah 10 tahun), dan cepat tumbuh (Wahyudi, 2014).

Kualitas kayu jati yang bagus menjadikannya bernilai cukup tinggi dibanding harga kayu lainnya dan sifat silvikulturnya yang secara umum telah diketahui banyak orang (Basri dan Wahyudi, 2013). Kondisi kayu jati yang tahan lama dan kuat menjadikan banyak pihak diantaranya Badan Usaha Milik Negara (BUMN), swasta, perusahaan, dan masyarakat ingin menanam jati untuk kebutuhan produksi (Pudjiono, 2014). Salah satu jenis pohon tropis terpenting di Indonesia adalah jati (Lukmandaru, 2011). Pulau Jawa banyak ditanami oleh jati terutama yang dikelola bagiannya oleh Perhutani dan berkembang untuk dikelola di luar Pulau Jawa (Ahsana *et al.*, 2011). Kayu jati dikenal sebagai kayu yang bernilai tinggi karena mempunyai sifat kayu yang kuat, awet, mudah untuk diolah walaupun termasuk kayu keras, serta memiliki penampilan yang bagus dipandang (Lacret *et al.*, 2012).

Pertumbuhan jati memiliki rotasi panen sekitar 60 sampai 80 tahun (Jha, 2016). Kebutuhan kayu yang terus meningkat, sementara pertumbuhan yang lambat menyebabkan ketersediaan kayu jati terus berkurang. Menurut Marsoem (2014), ratusan spesies tanaman jati tersebar di seluruh Indonesia, baik jati unggul maupun jati biasa. Tanaman jati memiliki banyak spesies dan menyebabkan kesulitan dalam membedakan satu dengan yang lainnya.

Menurut Asanurjaya (2012), identifikasi morfologi dilihat dari yang bisa dilihat oleh mata, diantaranya batang, daun, buah dan bunga dan identifikasi fisiologis harus melakukan uji untuk mengamati kandungan klorofil, konduktivitas stomata, diameter batang, tinggi tanaman dan jumlah daun (Anggraeni, 2015). Gambaran umum dari pohon jati (*Tectona grandis*) dapat dilihat pada Gambar 2.



(Sumber: Tribunnews.com)

Gambar 2. Pohon jati (*Tectona grandis*)

Bentuk daun jati bulat telur terbalik, berhadapan, dan mempunyai tangkai yang sangat pendek. Daunnya berukuran sekitar 70 cm × 80 cm sedangkan pada pohon tua menjadi sekitar 15 cm × 20 cm (Widiatmaka *et al.*, 2015). Daun yang masih muda dan berwarna kemerahan apabila diremas mengeluarkan getah warna merah. Rantingnya berbonggol di buku- buku batangnya dan berpenampang segi empat (Kosasih, 2013). Kayu jati memiliki berat jenis 0,62 g/cm³- 0,75 g/cm³ dan kelas kuat II-III yang mempunyai nilai keteguhan patah antara 800- 1200 kg/cm² (Batara, 2011).

Bunga jati bersifat majemuk yang tumbuh terminal diujung atau tepi cabang. Pada satu bunga (*monoceus*) jati terdapat bunga jantan (benang sari) dan bunga betina (putik). Buah pada pohon jati berdiameter sekitar 1 cm sampai 1,5 cm (Sumarna, 2012). Kayu jati terdiri dari kayu teras yang umumnya berwarna lebih gelap yaitu biasanya coklat kelabu atau merah kecoklatan sementara kayu

gubal berwarna lebih putih dan kelabu kekuningan. Kayu jati memiliki tekstur kasar dan tidak merata. Permukaan kayu terkadang seperti berminyak atau agak licin (Kosasih, 2013).

2.3. Kayu Pinus (*Pinus merkusii*)

Pinus memiliki beberapa jenis diantaranya adalah pinus tropis (*Pinus merkusii* Jungh. et de Vriese) atau yang dikenal juga dengan nama tusam, adalah satu-satunya jenis pinus yang memiliki sebaran di kebanyakan Asia Tenggara, seperti Thailand, Vietnam, Malaysia, dan Indonesia (Sitompul, 2019). Pinus yang mempunyai nama ilmiah *Pinus merkusii* (Harahap dan Aswandi, 2006). *Pinus merkusii* merupakan jenis pohon berdaun jarum yang termasuk dalam family *Pinaceae*. *Pinus merkusii* biasanya dijumpai di Pulau Sumatera bagian Utara yaitu Aceh, Tapanuli dan daerah Kerinci (Kalima *et al.*, 2005). Jati tumbuh pada daerah ketinggian 200 - 2.000 mdpl, dengan curah hujan antara 1.200 - 3.000 mm/tahun. Pinus sendiri tingginya dapat mencapai 10 m sampai 40 m dan tumbuh pada ketinggian 300 m sampai 1800 mdpl. Kayu pinus memiliki berat jenis antara $0,2 \text{ g/cm}^3$ - $0,69 \text{ g/cm}^3$ (Septiawan *et al.*, 2018). Kayu pohon pinus sering dimanfaatkan untuk dijadikan bahan-bahan mebel, perabotan rumah tangga, korekapi, sumpit, dan masih banyak lagi (Asrina, 2017).

P. merkusii dengan sebaran eko-geografisnya yang luas sebagai satu-satunya yang didistribusikan dibelahan bumi selatan sedang di konfirmasi bahwa jumlah pohon pinus biasanya bertambah banyak, terutama di daerah terganggu di daerah tropis dengan suhu tahunan 21 sampai 28°C (Andini *et al.*, 2021). Pinus adalah salah satu jenis pohon utama yang akan ditanam dalam skema perkebunan karena karakteristik, manfaat, dan khasiatnya. Populasi pinus juga meningkat pendapatan dari penyadapan resin dan 61% dilihat dari sisi nilai ekonomi dan pinus juga memainkan perananan ekologis melalui efeknya pada siklus air (Indrajaya and Wuri, 2008).

Tanaman pinus ini mempunyai getah yang berada pada batang. Pada batang, terdapat saluran getah dimana dalam saluran getah ada yang arahnya

vertikal maupun horizontal. Saluran getah ini terbentuk secara lisigen, sizogen, maupun sizoligen (Sasmuko *et al.*, 2004). Bentuk dari pohon pinus (*Pinus merkusii*) pada umumnya dapat dilihat pada Gambar 3.



(Sumber: Suarabogor.id)

Gambar 3. Pohon pinus (*Pinus merkusii*)

2.4. Kayu Lunak (*softwood*) dan Kayu Keras (*hardwood*)

Menurut Iswanto (2008), kayu merupakan bahan mentah yang didapatkan dari kekayaan alam. Sebelum memasuki proses pengolahan sebaiknya pengolah atau produsen sudah mengetahui sifat dan katagori kayu. Kayu dikatagorikan atau diklasifikasikan ke dalam dua jenis yaitu, kayu keras (*hardwood*) dan kayu lunak (*softwood*). Keduanya termasuk dalam divisi spermatophyta yang berarti tumbuhan berbiji. Kayu lunak memiliki daun yang menyerupai jarum, sedangkan kayu keras memiliki daun yang lebih lebar. Untuk ciri-ciri daun lebar dan daun jarum adalah sebagai berikut :

1. Ciri-ciri jenis pohon daun lebar sebagai berikut :
 - a. Umumnya bentuk daun lebar
 - b. Tajuk besar dan membuldar
 - c. Terjadi guguran daun
 - d. Pertumbuhan lambat/lama
 - e. Umumnya batang tidak lurus dan berbonggol

2. Ciri-ciri jenis pohon daun jarum sebagai berikut :
 - a. Umumnya bentuk daun seperti jarum
 - b. Tajuk berbentuk kerucut
 - c. Umumnya tidak menggugurkan daun kecuali beberapa jenis pohon saja
 - d. Pertumbuhan sangat cepat dan lurus ke atas

2.5. Laser

Teknik pada laser dilakukan dengan menghasilkan pancaran energi yang dapat dikontrol dan jika bersentuhan dengan suatu bahan, menghasilkan panas yang cukup besar dan terjadinya perubahan pada bahan tersebut. Energi panas disuplai oleh sinar laser memungkinkan pemesinan tanpa alat dengan energi panas aktif (Amaral *et al.*, 2019). Energi cahaya yang terkandung dalam radiasi laser diserap oleh benda kerja dan diubah menjadi energi panas. Sinar laser menjadi alat teknik yang sangat penting untuk pemotongan (Wijaya *et al.*, 2020). Pemotongan laser adalah salah satu aplikasi penting dan berguna yang dalam pengaplikasiannya yang luas di berbagai industri manufaktur dan teknologi ini memiliki kecepatan tinggi, pengaturan cepat, limbah rendah, presisi operasi yang baik dan biaya rendah. Ini adalah salah satu aplikasi terpenting untuk laser industri (Panek *et al.*, 2017).

2.6. Jenis Laser

Laser dapat dianggap sebagai alat untuk menghasilkan berkas energi yang dapat dikontrol dengan baik, yang, jika bersentuhan dengan suatu bahan, menghasilkan panas yang cukup besar. Energi sinar laser difokuskan pada diameter titik kecil untuk mencapai kepadatan daya yang diperlukan (Fathurahman *et al.*, 2015). Sebagian energi cahaya yang terkandung dalam radiasi laser diserap oleh benda kerja dan diubah menjadi energi panas. Teknologi sinar laser memiliki banyak aplikasi di hampir semua bahan yang dikenal, tetapi telah diteliti secara ekstensif hanya untuk industri logam (Kasman, 2013). Area aplikasi utama laser adalah penandaan, pengeboran, penggilingan mikro,

pemotongan, pengukiran, pengelasan, dan perlakuan panas/pengerasan di industri otomotif, pesawat terbang, dan mikroelektronika (Pritam, 2016).

2.6.1. Laser CO₂

Bagian utamanya yaitu *pumping device* berupa *electrode*, laser *resonator*/laser *tube*, *mirror*/cermin, dan lensa. Bentuk laser CO₂ pada umumnya bisa dilihat pada Gambar 4. Bahan aktif yang di dalamnya terisi oleh gas CO₂ merupakan laser resonator. Tabung resonator mempunyai dua sisi yang terdapat dua cermin yang saling berhadapan secara sejajar (Eltawahni *et al.*, 2019). Selanjutnya *pumping device/electrode* yang dapat mengeksitasi atom-atom gas CO₂. Atom yang meningkat energinya dari kondisi dasar menyebabkan foton bergerak dan menimbulkan gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik bergerak dalam arah tegak lurus dari cermin dan melalui bahan aktif gas CO₂ terjadi pemantulan oleh kedua cermin (Tohir, 2016). Laser CO₂ merupakan teknologi yang dalam penggunaannya memakai gas laser yang bersumber dari pencampuran gas utama yaitu karbondioksida (CO₂) dan gas lainnya yang distimulasikan menggunakan proses elektrik untuk memotong dan mengukir.

Cara penggunaan laser CO₂ dengan mengarahkan laser dengan diatur kekuatannya agar dapat memotong maupun mengukir kayu atau material lain dan diarahkan melalui komputer yang sudah mempunyai sistem untuk terhubung ke laser CO₂ (Fathurahman, 2015). Laser CO₂ dalam proses pengerjaannya menggunakan *software* yang berfungsi untuk memproses desain yang diinginkan. Setelah desain dimasukkan ke perangkat *software* selanjutnya mesin diatur sistemnya sesuai keinginan. Lalu, dilaser untuk menghasilkan ukiran sesuai keinginan kita (Gurau *et al.*, 2017).

Tingkat kerapihan dalam pengukiran menggunakan laser CO₂ juga lebih baik karena telah otomatis diatur dalam sistem *software*nya terlebih dahulu. Hasil laser CO₂ dipengaruhi oleh faktor kekuatan laser, kasar permukaan kayu, struktur kayu, kecepatan sinar laser, dan faktor manusia dalam mengoperasikannya

(Kushartanto, 2019). Laser CO₂ mempunyai banyak kegunaan diantaranya untuk pemotongan kayu, pembuatan lubang (*hole piercing*), mengebor kayu (*drilling*), pengelasan pada kayu, dan proses pengukiran kayu. Proses pemotongan dan pengukiran kayu menggunakan 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).



(Sumber:
AliExpress.com)

Gambar 4. Mesin laser CO₂

2.6.2. Laser He-Ne

Salah satu laser gas yang paling umum digunakan oleh masyarakat dan bernilai ekonomis yaitu laser Helium Neon (He-Ne) (Kotadiya *et al.*, 2018). Panjang gelombangnya 632,8 nm dengan cahaya berwarna merah, dengan variasi 543,5 nm (hijau), 594,1 nm (kuning), 611,9 nm (jingga) dan lain sebagainya. Penggunaan laser He-Ne biasanya pada holografi, spektroskopi, metrologi, perawatan medis, *barcode scanning* dan sebagainya (Manurung, 2013). Bentuk umum laser He-Ne ada pada Gambar 5.



(Sumber: Alibaba.com) Gambar 5. Laser He-Ne

2.6.3. YAG Laser

Laser Nd-YAG adalah sistem laser dengan 4 tingkat, yang berarti bahwa 4 tingkat energi terlibat dalam tindakan laser. Sumber energi cahaya seperti *flashtubes* atau diode laser digunakan untuk memasok energi ke medium aktif (Prihadianto *et al.*, 2015). Laser yang menggunakan kristal Nd-YAG sebagai medium lasing-nya ini, memiliki koherensi yang baik dan spektrum berkas luaranyang sempit, sehingga dapat diproduksi dengan daya yang sangat bervariasi yang menyebabkan bahwa laser ini disukai, sangat populer dan dapatdigunakan dalam berbagai bidang karena kelebihanannya (Wulandari, 2018).

Bentuk umum laser YAG ada pada Gambar 6.



(Sumber: AliExpress.com)

Gambar 6. Laser YAG

2.7. Pengukiran Laser Kayu

Pengukiran laser adalah praktik menggunakan laser untuk mengukir atau menandai suatu objek. Pengukiran laser adalah penghilangan bahan dari permukaan atas ke kedalaman tertentu. Beberapa penelitian ada tentang pengukiran logam, dan bahkan ada lebih sedikit penelitian yang terkait ukiran kayu (Amaral, 2019). Tinjauan penting dilakukan pada pengukiran laser untuk berbagai bahan, termasuk kayu, oleh Patel *et al.*, (2015), yang menyelidiki pengaruh parameter proses (daya laser, kecepatan pemindaian, dan frekuensi laser) pada kedalaman ukiran dan kekasaran permukaan. Patel *et al.*, (2015) mengakui pekerjaan yang menyelidiki pengukiran kayu menggunakan frekuensi pompa yang bekerja pada panjang gelombang 532 nm.

Parameter yang diperiksa pada pengukiran adalah frekuensi denyut, kecepatan berkas, jumlah pemindaian laser, dan kedalaman ukiran. Jenis laser CO₂ dapat digunakan dengan sukses untuk berbagai jenis kayu dengan gambar dekoratif dan geometri berukir 3D tanpa terbakar (Gurau, 2017). Beberapa spesies kayu dibutuhkan lebih banyak penelitian untuk mengkorelasikan spesies kayu dengan parameter proses yang sesuai, dengantujuan mencapai ukiran yang dalam tanpa karbonisasi dan tetap mempertahankanukiran yang homogeny (Patel *et al.*, 2014).

Iradiasi kayu dengan CO₂ laser, lebihbanyak energi yang dipasok berarti penurunan yang lebih besar dalam jumlah polisakarida yang terkandung dalam kayu (terutama degradasi hemiselulosa dan bagian dari komponen amorf selulosa) (Kacik, 2011). Terlepas dari jumlah dan konsentrasi energi yang disuplai, ketebalan lapisan sublim juga bergantung pada spesies kayu, karena terdapat keragaman spesies-spesies yang cukup besar dalamstruktur dan kekerasan, serta kadar air. Jenis laser yang digunakan juga dapat menyebabkan variabilitas (Li *et al.*, 2016).

2.8. Pengaruh Laser Terhadap Warna Kayu

Perubahan warna permukaan kayu yang ditargetkan serta modifikasi sifat permukaan kayu lainnya sebagian besar dilakukan hanya berdasarkan pengalaman empiris. Oleh karena itu, kuantifikasi ketergantungan tingkat perubahan warna pada jumlah energi yang disuplai tampaknya merupakan alat yang menjanjikan untuk pemecahan masalah ini (Kucerov *et al.*, 2019).

Sinar laser adalah berkas cahaya berintensitas tinggi yang dapat difokuskan secara ketat ke suatu tempat saja yang biasanya dengan diameter 0,2 mm (Gurau *et al.*, 2017). Energi sinar laser difokuskan ke diameter titik kecil untuk mencapai kepadatan daya yang diperlukan. Kepadatan daya tinggi dari sinar laser terfokus di tempat melelehkan atau menguapkan materi dalam sepersekian detik (Bonifazi *et al.*, 2015).

Cara untuk mensuplai energi ke permukaan kayu adalah iradiasi dengan CO₂ kinerja laser dalam rentang spektral inframerah (panjang gelombang 10.6 μ m). Teknologi perlakuan pada progresif ini menggunakan sinar laser yang bertindak sebagai alat pemotong klasik. Metode ini sering digunakan untuk memotong, mengebor, memberi label, dan mengukir permukaan pada berbagai bahan logam dan non-logam (Gurau *et al.*, 2017). Keuntungan dari perlakuan ini adalah koefisien absorpsi yang memiliki nilai efisiensi dan memudahkan penentuan jumlah energi yang disuplai ke permukaan kayu oleh sinar laser. Dengan cara ini, struktur dan properti kayu dapat dimodifikasi sesuai dengan tujuan yang dimaksudkan (Laskowska, 2020). Jumlah energi yang disuplai ke permukaan kayu dengan bantuan sinar laser dapat dikontrol dengan menyesuaikan daya sinar laser, kecepatan gerakan kepala laser, jarak fokus, dan kepadatan raster (jumlah jalur sinar laser per satu milimeter melintasi lebar) (Srinivas and Pandey, 2012).

Jenis perawatan permukaan kayu (mekanik, panas-hidro-mekanik, laser CO₂, dan lainnya) menyebabkan perubahan pada kimia kayu dan struktur anatomi dan akibatnya menyebabkan perubahan dalam sifat material ini. Perubahan kimiawi yang diinduksi energi yang diserap pada penyusun utama kayu direspon oleh perubahan warna permukaan kayu, morfologi, dan juga kinerja

hidrofilik/hidrofobiknya (Lukmandaru, 2011). Selama pengukiran permukaan kayu, energi yang terkonsentrasi pada sinar laser dan disuplai ke tempat yang ditentukan diubah menjadi panas. Suhu tinggi menyebabkan sublimasi lapisan permukaan kayu tipis (Kacik and Kubovský, 2013).

2.9. Pengaruh Laser Terhadap Kekasaran Kayu

Pengamatan mikroskopis menunjukkan bahwa perlakuan permukaan kayu dengan sinar laser dapat menghaluskan kekasaran kayu karena sel-sel kayu yang meleleh hingga kedalaman beberapa mikrometer, tetap saja, tanpa karbonisasi (Ann, 2018). Perubahan morfologi yang signifikan yang diwujudkan melalui peningkatan kekasaran tidak terjadi tetapi pada dosis iradiasi tertinggi, yang terutama yaitu sebagai hasil dari lapisan permukaan kayu berkarbonisasi (Kacik and Kubovský, 2013).

Permukaan kayu yang diukir dengan laser dapat menimbulkan hasil yang berbeda dari kondisi awal. Menurut Gurau *et al.* (2017), mengamati bahwa kekasaran permukaan pada kayu secara signifikan dipengaruhi oleh kekuatan laser dan kecepatan perpindahan kepala laser. Meningkatnya daya laser, maka nilai dari semua parameter kekasaran yang dipelajari meningkat secara linier dengan meningkatnya kecepatan perpindahan kepala laser. Bentuk-bentuk energi yang berbeda juga mempengaruhi kayu (Ismail, 2012).

Patel (2014) menggunakan kekasaran permukaan sebagai respon untuk berbagai parameter dalam pengukiran laser. Ditemukan bahwa kekasaran permukaan meningkat dengan frekuensi laser yang lebih tinggi dan kecepatan pengukiran yang lebih rendah. Menurut Pritam (2016) menemukan bahwa kekasaran permukaan dijelaskan bahwa target untuk meminimalkan kekasaran permukaan, sekaligus memaksimalkan kedalaman pengukiran harus mencapai rongga yang lebih dalam, tetapi dengan kekasaran yang lebih sedikit, peningkatan jumlah pemindaian laser dengan daya yang lebih rendah dan kecepatan pemindaian yang lebih tinggi.

Menurut Petutschnigg *et al.* (2013), mengeksplorasi opsi untuk merawat permukaankayu dengan laser balok untuk mengembangkan kemungkinan estetika baru dan menemukan aplikasi dalam desain. Studi ini membahas perlakuan laser

yang berbeda untuk sampel dari berbagai spesies kayu: beech, ash, lime, dan spruce. Penulis memvariasikan daya sinar laser dari 40 hingga 120 W dan jumlah titiklaser di permukaan, sambil menjaga kecepatan pemindaian konstan, dan mengukur warna yang dihasilkan. Daya sinar laser mempengaruhi perubahan warna dalam pola yang berbeda dan bergantung pada spesies (Mansur *et al.*, 2019).

Suatu material pasti memiliki kekasaran permukaan yang nantinya akan dijadikan suatu komponen dan harus sesuai dengan fungsi komponen itu sendiri (Prasetyo, 2015). *Roughness Average* (Ra) menyatakan nilai kekasaran. Ra adalah simpangan mutlak profil kekasaran dari garis tengah rata-rata aritmatika. Permukaan suatu benda dibedakan menjadi dua yaitu kasar (*roughness*) dan permukaan bergelombang (*waviness*) dan keduanya dapat menimbulkan kesalahan bentuk (Hakim *et al.*, 2017). Cara kerja alat ukur ini adalah sensor alat ditempelkan kepada objek dan disamakan tinggi permukaan alat dengan objek agar bisa terdeteksi, lalu tekan tombol *start* dan kemudian keluar nilai kekasaran permukaan yang ditampilkan pada layar alat ukur (Azhar, 2014).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Kegiatan penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan dan Workshop Laboratorium Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Penelitian ini juga menganalisis tingkat kekasaran permukaan papan kayu yang dilaksanakan di Laboratorium Metrologi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penelitian untuk analisis mikroskopis dilaksanakan di Laboratorium Ilmu Hama dan Tumbuhan, Jurusan Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Penentuan lokasi penelitian ditentukan dengan pertimbangan bahwa lokasi tersebut menyediakan alat yang dibutuhkan untuk penelitian ini. Waktu penelitian dilakukan pada bulan Februari-Mei 2022.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin laser CO₂ 6040-50 Watt, alat uji kekasaran Mitutoyo SJ-201, alat ukur warna *Colorimeter Amtast* AMT507, mikroskop digital stereo, *stabilizer*, alat tulis, computer, sarung tangan, kamera, *laptop*, kaca mata laboratorium, masker, dan sarung tangan. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah papan kayu lunak dan kayu keras yaitu kayu pinus (*Pinus Merkusii*) dan kayu jati (*Tectona grandis*) dengan masing-masing berukuran ukuran 30 cm x 20 cm x 2 cm dan *thally sheet*.

3.3. Rancangan Penelitian

Penelitian ini memakai faktor kekuatan (*power*) laser yang dapat mempengaruhi tingkat kekasaran dan warna pada papan kayu jati dan kayu pinus. Kekuatan darisinar laser yang dikeluarkan mempunyai tingkatan agar dapat melihat perbedaan pada kayu jati dan kayu pinus. Kekuatan laser yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 5% (2,5 watt), 10% (5 watt), dan 15% (7,5 watt), 20% (10 watt), dan 25% (12,5 watt). Setiap kayu mendapat perlakuan tingkat kekuatan laser yang sama dan dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali pada papan kayu di kayu jati (*Tectona grandis*) maupun kayu pinus (*Pinus merkusii*).

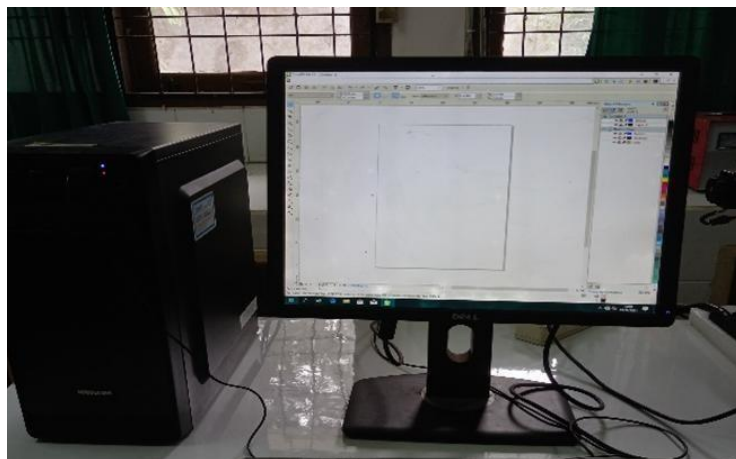
3.4. Prosedur Penelitian

3.4.1. Persiapan dan Pengaturan Alat

Persiapan alat dan beberapa pengaturan alat dalam mesin laser CO₂ (LS-6040 50W, Glorystar) diantaranya meliputi *smoke pipe*, *smoke fan*, *water pump*, *power wire*, *ground wire*, *parallel port wire* dan USB key dipasang pada mesin laser. *Smoke pipe* dan *smoke fan* digunakan sebagai pengatur sirkulasi keluar masuknya udara ke dalam mesin laser. *Water pump* digunakan untuk mengalirkan air keluar masuk ke dalam mesin laser sebagai pendingin mesin laser. *Power wire* digunakan sebagai penghubung mesin laser dengan sumber tegangan. *Ground wire* digunakan sebagai sistem grounding pada mesin laser yang menghubungkan mesin laser dengan *ground*. Mesin laser CO₂ yang akan digunakan dapat dilihat pada Gambar 8. *Parallel port wire* digunakan sebagai penghubung antara mesin laser dengan komputer sebagai pengendali mesin laser melalui *software*.

Software yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7. Penelitian ini menggunakan *software* yaitu Program *Corel Laser DRW X7*. *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 membuka beberapa ekstensi file. Pada saat penggunaan *software* ini yang harus

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 7. Perangkat *software*

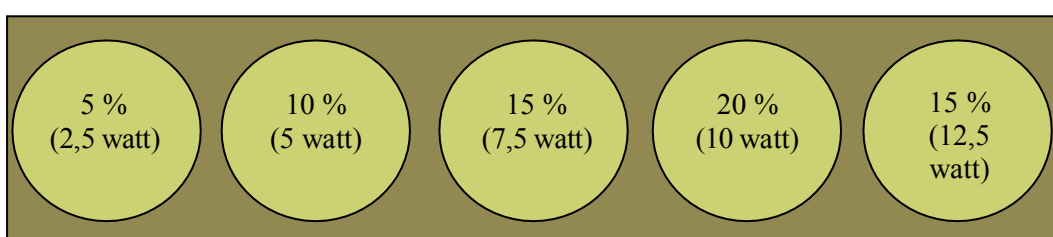


Gambar 8. Mesin laser CO₂

3.4.2. Desain Pola

Tahapan sebelum melakukan proses gravir adalah pembuatan desain pola gravir. Pembuatan desain melalui aplikasi program *Corel Laser DRW X7*. Tahap pertama setelah membuka program Laser DRW adalah mendesain layout sesuai dengan luas papan kayu pinus (*Pinus merkusii*) dan kayu jati (*Tectona grandis*)

yang digunakan yaitu 30 cm x 20 cm. Setelah layout sudah tersedia maka selanjutnya yaitu membuat pola yang akan diukir pada papan kayu. Pola yang digunakan yaitu bentuk lingkaran dengan diameter 2 cm. Pengujian tingkat kekasaran dan warna dilakukan pada satu arah yaitu arah horizontal yang akan digravir dengan bentuk lingkaran berdiameter 2 cm. Masing masing pola akan digravir dengan arus dan kecepatan yang sama pada papan kayu pinus dan jati dengan kekuatan laser CO₂ yang digunakan yaitu 5% (2,5 watt), 10% (5 watt), dan 15% (7,5 watt), 20% (10 watt), dan 25% (12,5 watt) (Gambar 9).



Gambar 9. Pola pada papan kayu

3.4.3. Peletakan Papan Kayu Pinus (*Pinus merkusii*) dan Kayu Jati (*Tectona grandis*)

Papan kayu pinus dan jati yang sudah tersedia dibersihkan terlebih dahulu permukaannya dan diampelas permukaannya agar mendapatkan kekasaran permukaan kayu yang sama. Jarak antara *laser head* dengan permukaan papan untuk pola gravir jaraknya adalah 1 cm. Jarak antara laser head dengan permukaan papan ini sangat berpengaruh terhadap hasil proses gravir. Kedataran alas meja kerja juga mempengaruhi hasil laser. Untuk mengatur kedataran meja kerja ini digunakan *waterpass*. Alas meja kerja diatur hingga *waterpass* menunjukkan keadaan seimbang biasanya dibantu dengan kertas tambahan agar seimbang. Bentuk tata letak kayu yang akan diuji lebih lanjut dapat dilihat pada Gambar 10



Gambar 10. Peletakan papan kayu

3.4.4. Proses Pengujian Gravir pada Papan Kayu

Pada penelitian ini dilakukan proses gravir terhadap masing-masing bahan papan kayu. Setelah pola sudah didesain serta papan kayu pinus dan jati sudah berada pada posisi alas meja kerja yang dibuat, maka dilakukan proses gravir. Pada program *Corel Laser DRW X7*, dipilih ikon Engrave kemudian diatur terlebih dahulu proses yang ingin dikerjakan. Pengaturan ini dilakukan pada program *Corel Laser DRW X7*, Engraving manager yaitu pada *Style* dimana dipilih Engraving. Proses gravir pola yang sudah didesain, dilakukan dengan mesin laser pada papan kayu pinus dan kayu jati. Proses gravir ini dipengaruhi oleh beberapa parameter. Pada penelitian ini parameter yang akan dikendalikan yaitu daya power dari laser. Pengendalian daya power laser gravir dilakukan dengan mengubah pengaturan pada *software* LaserDRW dan pengaturan pada mesin laser.

3.4.5. Analisis Hasil Pengukiran (*Engraving*)

Analisis pengaruh kekuatan laser CO₂ terhadap kekasaran permukaan dan warna permukaan pada kayu pinus dan kayu jati dilakukan dengan beberapa metode antara lain pengujian perubahan warna, pengujian kekasaran permukaan, pengujian kadar air, pengujian kerapatan, pengujian mikroskopis, dan preferensi konsumen.

3.4.5.1. Pengujian Perubahan Warna

Pengujian selanjutnya adalah menganalisis perubahan warna (sifat fisis) yang dilakukan terhadap kayu pinus dan jati dilakukan sebelum dan setelah di laser. Hasil laser menyebabkan perubahan warna yang selanjutnya dianalisis menggunakan sistem CIE-*Lab* yang parameternya yaitu nilai kecerahan (L^*), kromatisasi merah/hijau (a^*), dan kromatisasi kuning/biru (b^*) (lihat Gambar 11). Perubahan warna ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔE^* dapat dihitung dengan persamaan:

$$\Delta L^* = L^*_2 - L^*_1$$

$$\Delta a^* = a^*_2 - a^*_1$$

$$\Delta b^* = b^*_2 - b^*_1$$

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

Keterangan:

L^* = Tingkat Kecerahan (hitam ke putih)

L^*_1 = Kecerahan sampel sebelum engraving

L^*_2 = Kecerahan sampel setelah engraving

a^* = Kromatisitas (merah ke hijau)

a^*_1 = Kromatisitas (merah ke hijau) sebelum engraving

a^*_2 = Kromatisitas (merah ke hijau) setelah engraving

b^* = Kromatisitas (kuning ke biru)

b^*_1 = Kromatisitas (kuning ke biru) sebelum engraving

b^*_2 = Kromatisitas (kuning ke biru) setelah engraving

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

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

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

ΔE^* = Perubahan warna akibat sebelum dan sesudah *engraving*

Perubahan warna dapat ditentukan dengan derajat perubahan warna dengan klasifikasi sebagai berikut.

$0,0 < \Delta E^* \leq 0,5$ = 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

Dimana (L^*) menunjukkan kecerahan, (a^*) dan (b^*) masing-masing menunjukkan kemerahan (hijau ke merah) dan kekuningan (biru ke kuning).

Sedangkan (ΔE^*) adalah perubahan warna akibat sebelum dan sesudah *engraving*,

(ΔL^*) adalah perbedaan antara nilai (L^*) sebelum dan sesudah *engraving*, (Δa^*)

adalah perbedaan antara nilai (a^*) sebelum dan sesudah *engraving*, dan (Δb^*)

yaitu perbedaan antara nilai (b^*) sebelum dan sesudah *engraving*. Perubahan

warna dapat ditentukan dengan derajat perubahan warna dengan klasifikasi pada

Tabel 1 (Valverde dan Moya, 2014):

Tabel 1. Klasifikasi Perubahan Warna

No.	Nilai Klasifikasi	Keterangan
1	$0,0 < \Delta E^* = 0,5$	Perubahan Dapat Dihiraukan
2	$0,5 < \Delta E^* = 1,5$	Perubahan Warna Sedikit
3	$1,5 < \Delta E^* = 3$	Perubahan Warna Nyata
4	$3 < \Delta E^* = 6$	Perubahan Warna Besar
5	$6 < \Delta E^* = 12$	Perubahan Warna Sangat Besar
6	$\Delta E^* > 12$	Warna Berubah Total



Gambar 11. Alat ukur warna *Colorimeter Amtast AMT507*

3.4.5.2. Pengujian Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness Test*)

Kekasaran permukaan diuji untuk mengetahui tingkat kekasaran sebelum dan setelah dilaser. Kayu yang diuji nilai kekasaran dinyatakan dalam *Roughness Average* (Ra). Penelitian ini menggunakan alat *Surface Roughness Tester* (SJ-201) (Gambar 12). Pengujian kekasaran permukaan terhadap kayu pinus dan jati dilakukan sebelum dan setelah di laser.



Gambar 12. Alat uji kekasaran Mitutoyo SJ-201

Nilai kekasaran permukaan didapatkan sesuai tingkat kekasaran yang telah diuji. Bagian sensor alat ukur kekasaran permukaan disebut panjang sampel.

Beberapa parameter kekasaran permukaan, yaitu :

- Kekasaran total (R_t) merupakan jarak antara garis referensi dengan garis alas.
- Kekasaran perataan (R_p) merupakan jarak rata-rata antara garis referensi dengan garis terukur.
- Kekasaran rata-rata aritmatik (R_a) merupakan nilai rata-rata aritmatik antara garis tengah dan garis terukur (Prasetyo, 2014).

3.4.5.3. Pengujian Kadar Air

Penelitian ini melakukan uji kadar air pada papan kayu jati dan kayu pinus yang tiap papannya telah dipotong sebagian 5 cm x 5 x cm. Nilai kadar air didapatkan karena bagian air yang bebas dalam kayu akan menguap sampai kayu benar-benar kering dan seimbang antara kadar air dengan udara. Energi panas yang digunakan untuk pengujian kadar air yaitu berasal dari oven. Kayu yang sudah dipotong berukuran seragam dikeringkan dalam oven suhu $100 \pm 3^\circ\text{C}$ selama 24 jam (Gambar 13). Kemudian didinginkan dalam desikator selama 1 jam kemudian ditimbang dan akan mendapatkan hasil berat kayu setelah dioven. Kadar air dihitung menggunakan persamaan standar (SNI 7973:2013):

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

Keterangan:

KA = Kadar Air (%)

BA = Berat Awal (g)

BK = Berat Kering Oven (g)

3.4.5.4. Pengujian Kerapatan

Penelitian ini melakukan uji kerapatan pada papan kayu jati dan kayu pinus. Pengujian kerapatan terhadap kayu pinus dan jati dilakukan sebelum dan setelah di oven. Pertama, potongan kayu sebelum dioven diukur kerapatannya kemudian potongan kayu yang sudah diuji kadar airnya (dioven) diukur kembali untuk mengetahui kerapatan kayunya. Kerapatan pada umumnya dinyatakan dalam perbandingan massa dan volume, yaitu dengan cara menimbang dan mengukur volume dalam keadaan kering udara. Kerapatan kayu dapat dihitung dengan menggunakan standar (SNI 7973:2013) dengan rumus persamaan kerapatan:

$$KR = \frac{m}{v}$$

Keterangan:

KR = Kerapatan (g/cm³)

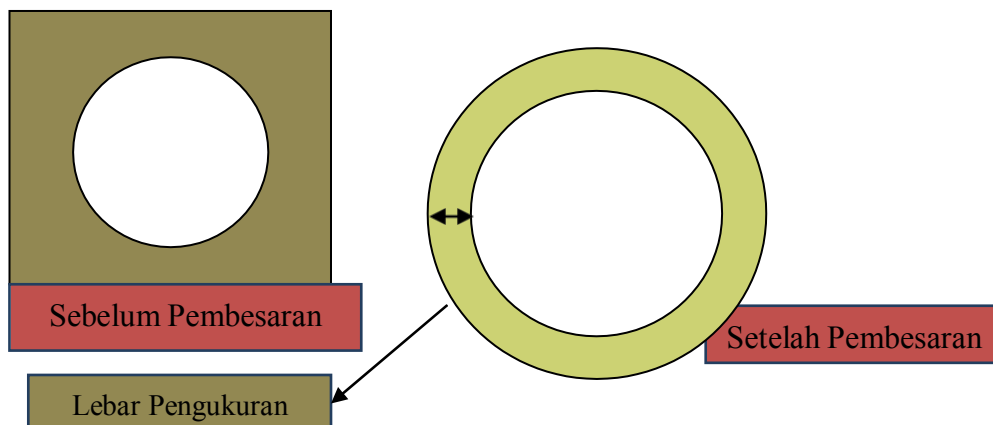
M = Massa kayu (g)

V = Volume (cm³)

3.4.5.5. Pengujian Mikroskopis

Pengamatan uji mikroskopis pada lebar hasil laser dilakukan dengan menggunakan mikroskop digital stereo (EZ4, *Leica Microsystems, Wetzlar*, Jerman) (Gambar 13). Hasil dari kayu yang sudah dilaser, selanjutnya akan diamati oleh alat mikroskopis dan menghasilkan gambar yang kemudian dianalisis untuk mengukur lebar hasil pengukiran dengan kekuatan laser yang berbeda-beda (µm). Pengukuran lebar hasil laser menggunakan perangkat lunak Leica LAS EZ. Kekuatan laser yang digunakan untuk uji mikroskopis yaitu 2,5 Watt,

5 Watt, dan 7,5 Watt, 10 Watt, dan 12,5 Watt. Hasil laser merupakan bentuk lingkaran dengan pengukuran lebar hasil laser yang diamati ada pada bagian atas, kanan, bawah, dan kiri lingkaran (lihat Gambar 14).



Gambar 14. Pola uji mikroskopis



Gambar 13. Alat mikroskop Stereo Leica EZ4

3.4.6. Preferensi Konsumen

Survei preferensi konsumen ini dilakukan dengan menyebar kuisisioner pada responden dengan menggunakan *googleform*. Sesuai dengan metode penentuan responden dimana targetnya untuk 22.262 orang mahasiswa Universitas Lampung. dengan rentang umur 18-23 tahun. Kuisisioner didesain sedemikian rupa sehingga mudah diisi oleh responden dan pertanyaan mudah dipahami oleh responden karena responden yang berasal dari berbagai jurusan dan mungkin kurang memahami mengenai produk hasil laser CO₂. Bentuk dari hasil laser itu sendiri menggunakan logo *Avangers* pada papan kayu jati dan kayu pinus dan menggunakan kekuatan laser sebesar 2,5 Watt, 5Watt, dan 7,5 Watt, 10 Watt, dan 12,5 Watt, dimana logo *Avengers* dipilih dalam penelitian preferensi

konsumen ini karena bentuknya sendiri yang cukup rumit dan dapat menarik perhatian konsumen yang usianya tergolong muda. Pengambilan sampel ini dilakukan secara acak (*random sampling*). Responden dipilih berdasarkan rumus *slovin* dengan tingkat kesalahan sebesar 10% dan tingkat kepercayaan 90%.

Rumus:

$$n = \frac{N}{1 + N(e)^2}$$

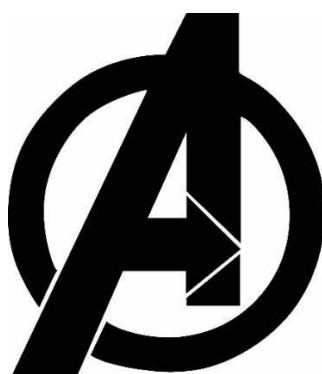
Keterangan:

n = Ukuran sampel/jumlah responden

N = Ukuran populasi

e = Perkiraan tingkat kesalahan

Berdasarkan rumus *slovin*, maka sampel yang diambil sebanyak 100 responden. Proses pengambilan data preferensi konsumen dilakukan dengan mewawancarai responden, bagaimana tanggapannya mengenai produk hasil laser CO₂, memilih dan memberi alasan pada setiap kayu yang disukai oleh responden, lalu melakukan wawancara mendalam untuk membahas lebih lanjut alasan mengapa responden memilih kekuatan laser tersebut.



(Sumber: dlpng.com)

Gambar 15. Motif preferensi konsumen terhadap hasil laser

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Simpulan dari penelitian yang telah dilakukan adalah.

1. Pengaruh kekuatan sinar laser CO₂ terhadap tingkat kekasaran permukaan kayu jati (*Tectona grandis*) dan kayu pinus (*Pinus merkusii*) yaitu semakin meningkat kekuatan laser, maka tingkat kekasaran pada kayu yang diuji cenderung semakin meningkat. Pembakaran yang terjadi menggunakan mesin laser CO₂ menyebabkan kondisi awal kayu yang rata menjadi kurang rata karena energi panas yang dikeluarkan mesin.
2. Pengaruh kekuatan sinar laser CO₂ terhadap perubahan tingkat kecerahan kayu jati (*Tectona grandis*) dan kayu pinus (*Pinus merkusii*) yaitu semakin meningkat kekuatan laser, maka perubahan tingkat kecerahan warna menjadi lebih gelap dan warna sudah berubah total dari warna awal kayu tersebut. Pembakaran yang terjadi menyebabkan warna awal kayu menjadi gelap karena energi panas yang dikeluarkan mesin.
3. Hasil laser pada kayu jati dan kayu pinus dengan kekuatan laser 25% (12,5 watt) lebih banyak disukai oleh para responden, dimana banyak yang memberikan alasan bahwa koondisi ukiran terlihat lebih rapih, tidak menimbulkan banyak bayangan dibanding kekuatan laser lainnya, dan terlihat lebih menarik karna warna yang hitam pekat.

5.2. Saran

Uji penggunaan laser CO₂ terhadap kedalaman hasil laser karena saat uji kekasaran permukaan, kedalaman kayu tidak rata dan menyebabkan susah untuk dideteksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahsana D., Hamidah, Soedarti T., CESA. 2011. *Keanekaragaman Varietas dan Hubungan Kekerabatan pada Tanaman Jati (Tectona grandis Linn.) Melalui Pendekatan Morfologi di Kebun Bibit Permanen Kecamatan Kedungpring Lamongan*. Skripsi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga. Surabaya.
- Andini, R., Melinda, V., Pardede, E., Yanti, L., A., Hmon, K., P., W., Moulana, R1., Indrioko, S. 2022. *Morphological Variation of Aceh Pinus (Pinus merkusii)*. In: Proceeding of The 3rd International Conference on Agriculture and Bio-industry (ICAGRI 2021). Banda Aceh. Indonesia.
- Anggraeni, D. 2015. *Karakter Fisiologis dan Agronomis Bibit Kakao (Theobromacacao L.) yang Berasosiasi dengan Synechococcus sp. pada Media dengan Berbagai Kadar Bahan Organik*. Skripsi Fakultas Pertanian Universitas Jember. Jember.
- Amaral, I., Silva, G., Pinto, R., Campilho, and R, Gouveia. 2019. "Improving the Cut Surface Quality by Optimizing Parameters in the Fibre Laser Cutting Process." *29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*". 38 (8) : 1111–1120.
- Ann. 2018. *WULS-SGGW Untuk. Wood Technol.* 103 (4): 64–69. German.
- Asanurjaya, B. 2012. *Identifikasi Tanaman Jati Menggunakan Probabilistic Neural Network dengan Ekstraksi Fitur Ciri Morfologi Daun*. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Asrina. 2017. *Struktur dan Komposisi Tumbuhan Bawah di Areal Bekas Terbakar Tegakan Pinus merkusii Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin*. Skripsi S-1 Fakultas Kehutanan Universitas Hasanuddin. Makassar.
- A, Widiyanto, Alfi, R., Alfi, R. 2018. *Prototype Pembuatan Cnc Dengan Pemanfaatan Pemanfaatan Motor Stepper Berbasis Arduino Uno*. Universitas Teknologi Yogyakarta. Yogyakarta.

- Aulia S., J, Setiawan., and M, Ariyanto. 2018. "Rancang-bangun prototipe mesin CNC laser engraving dua sumbu menggunakan diode laser," *J. Tek. Mesin Indonesia*. 13 (1) : 32–37.
- Azhar., M.C. 2014. Analisa Kekasaran Permukaan Benda Kerja Dengan Variasi Jenis Material Dan Pahat Potong. *Skripsi*. Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Bengkulu. Bengkulu.
- Badan Pusat Statistik. 2019. *Statistik Produksi Kehutanan 2019*.
- Basri, E., dan Wahyudi, I. 2013. Sifat Dasar Kayu Jati Plus Perhutani Dari Berbagai Umur dan Kaitannya Dengan Sifat dan Kualitas Pengeringan. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 31(2) : 93-102.
- Batara, Edy M. 2011. *Potensi Budidaya jati*. *Skripsi, Fakultas Pertanian: Program Studi Kehutanan*. Universitas Sumatra Utara. Sumatera Utara.
- Bonifazi, G., Calienno, L., Capobianco, G., Monaco, AL, Pelosi, C., Picchio, R., Serranti,S. 2015. Pemodelan perubahan warna dan kimia pada kayu beech jantung normal dan merah dengan spektrofotometri reflektansi, spektroskopiInframerah Transformasi Fourier dan pencitraan hiperspektral. *Jurnal Degradasi &Stabilitas Polimer*. 113 (4) : 10-21.
- Bram, D dan Gesang, S. 2015. "Pengaruh Kecepatan Potong pada Pemotongan Polymethyl Methacrylate Menggunakan Mesin Laser Cutting". Jurusan Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada. *Seminar Nasional Teknologi 2015 Institut Teknologi Nasional Malang*. Malang.
- Dubey, K. M., S. Pang, J. Walker. 2010. Color And Dimensional Stability Of Oil Heat-Treated Radiata Pinewood Afer Accelerated UV Weathering. *Forest Prod. J*. 60 (5): 453-459.
- Elsani, Istihanah, Nurul. 2017. *Getah Pohon Kudo (Lannea coromandelica) Sebagai Alternatif Perekat Untuk Produk Kerajinan*. Balai Besar Kerajinan dan Batik. Indonesia.
- Eltawahni, Hayat A., Abdul G. Olabi, and Khaled Y. Benyounis. 2019. "CO2 Laser Cutting Process of PMMA." *J. Materials Science and Materials Engineering*. 1 (1) : 1-29.
- Fathurahman, Gesang Nugroho, dan Heriyanto. 2015. "Pengaruh Perubahan Kecepatan dan Daya terhadap Lebar Celah Laser pada Mesin Laser Cutting Kapasitas 60 Watt dengan Material Akrilik". *Seminar Nasional Teknologi*. Malang.
- F. J. Daywin, D. W. Utama, W. Kosasih, and K. William. 2019. Perancangan Mesin 3D Printer Dengan Metode *Reverse Engineering* (Studi Kasus di

- Laboratorium Mekanika dan Robotics Universitas Tarumanagara). *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*. 7 (2) : 79–89.
- Gurau, L dan Petru, A. 2018. Pengaruh CO₂ Output Daya Sinar Laser dan Kecepatan Pemindaian pada Kualitas Permukaan Maple Norwegia (*Acerplatanoides*). *J. Bio Resources*. 13 (4) : 8168-8183.
- Gurau, L .; Petru, A .; Varodi, A .; Timar, M. 2017. Pengaruh CO₂ keluaran daya sinarlaser dan kecepatan pemindaian pada kekasaran permukaan dan perubahan warna beech (*Fagus sylvatica*). *J. Bio Resources*. 12 (3) : 7395–7412.
- Hadjib, N. 2009. Daur Teknis Pinus Tanaman Untuk Kayu Pertukangan Berdasar Sifat Fisis dan Mekanis. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 27(1):1-20.
- Harahap, R dan Aswandi. 2006. Pengembangan dan Konservasi Tusam (*Pinus merkusii Jun get de Vriese*). Pusat Litbang Hutan dan Konservasi Alam. Bogor.
- Hidayat, W., Febrianto, F. 2018. *Teknologi Modifikasi Kayu Ramah Lingkungan: Modifikasi Panas Dan Pengaruhnya Terhadap Sifat-Sifat Kayu*. Buku. Pustaka Media. Bandar Lampung. 127 Hlm.
- Hidayat, W., Febrianto, F., Purusatama, B. D., Kim, N. H. 2018. Effects of heat treatment on the color change and dimensional stability of gmelina arborea and melia azedarach woods. *E3S Web of Conferences*. 68(1): 1-11.
- Ichsan, M., A. Yufrizal., Refdinal., Rifelino. 2020. Pengaruh variasi side rake angel dan kedalaman pemotongan penyekrapan datar terhadap nilai kekasaranpermukaan baja karbon rendah st-37. *Journal of Mechanical Electrical and Industrial Engineering*. 2(2): 35-43.
- Indrajaya, Y dan Wuri, H. 2008. *Potensi hutan Pinus merkusii Jungh. et de Vriese sebagai pengendali tanah longsor di Jawa*. Info. Hutan
- Ismail, K. 2012. *Analisis Fabrikasi perangkat Mikrofluidik Pada MaterialAcrylic Menggunakan Laser CO₂ Daya Rendah*. FT UI. Jakarta
- Iswanto, A H. 2008. *Struktur Anatomi Kayu Daun Lebar (Hardwood) dan Kayu Daun Jarum (Softwood)*. Departemen Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Sumatra Utara. Sumatra Utara.
- Jha, K. 2016. What Should Be The Rotation Age And Harvest Management In Teak. *Indian Forest Journal*. 142 (4) : 309–316.

- Kacik, F., Kubovský, I. 2011. Perubahan Kimiawi Pada Kayu Beech Karena CO₂ Iradiasi Laser. *J. Photochem Photobiol.* 222 (3) : 105–110.
- Kalima, U., Sutisna, R., Harahap. 2005. Studi Sebaran Alam *Pinus Merkusii Jung Het DeVriese* Tapanuli, Sumatera Utara Dengan Metode Cluster Dan Pemetaan Digital. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam.* 2(5) : 497-505.
- Kasman dan Sefika. 2013. Impact Of Parameters On The Process Response: A Taguchi Orthogonal Analysis For Laser Engraving. *J.Measurement.* 46 (7) : 2577–2584.
- Kosasih, E. 2013. *Produksi Bibit Berkualitas; Jati (Tectona grandis L. F.)*. Balai Perbenihan Tanaman Hutan Jawa, Madura dan Sumedang. Jawa Barat.
- Kotadiya, J., Jaydeep M., Kapopara, Anjal R., Patel, Chirag G., Dalwadi, and Pandya. 2018. Parametric analysis of process parameter for Laser cutting process on SS-304. *Materials Today: Proceedings.* 5(6) : 5384–5390.
- Kucerov, V., Lagana, R. ; Hyrošov. 2019. Perubahan Sifat Kimia Dan Optik Serat Perak (*Abies Alba L.*) Kayu Karena Perlakuan Termal. *J. Wood Sci.* 65 (4): 21.
- Lacret, R., Varela, R., Molinillo, J., Nogueiras, C., and Macias, F. 2012. Tectonoelins Or Lignans From A Bioactive Extract Of *Tectona Grandis*. *Phytochemistry Letters.* 5 (4) : 382–385.
- Laskowska, A. 2020. Pengaruh Radiasi Ultraviolet Pada Warna Beech Dan Kayu Ek Yang Dimodifikasi Secara Termo-Mekanis. *J. Ciencia Tecnolog.* 22 (3) : 126.
- Lembang, M. 2014. Sifat Dasar dan Potensi Kegunaan Jabon Merah. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea.* 3 (2):163-175.
- Li, R., Guo, X., Cao, P., Wang, X., 2016. Optimalisasi Parameter Pemotongan Laser Untuk Bambu Rekombinan Berdasarkan Metodologi Permukaan Respon. *J. PenelitianKayu.* 61 (2) : 275-285.
- Li, R. ; Xu, Wang, X.; Wang, C. 2018. Pemodelan Dan Prediksi Perubahan Warna Permukaan Kayu Selama Modifikasi Laser. *J. Bersih. Melecut.* 183 (4) : 818–823.
- Lukmandaru, G. 2011. Variability In The Natural Termite Resistance Of Plantation TeakWood And Its Relationship With Wood Extractive Content And Color Properties. *Indonesian Journal of Forestry Research.* 8 (1) : 17–31.

- Mansur, M., Yusuf, I., & Marzuki, M. 2019. Rancang Bangun Mesin CNC Drilling Menggunakan Sistem Kontrol GRBL Untuk Pembuatan Lubang PCB. *Jurnal Mesin Sains Terapan*. 3(2) : 58-63.
- Marsoem, N., Prasetyo, V., Sulistyono, J., Sudaryono, & Lukmandaru, G. 2014. Studi Mutu Kayu Jati Di Hutan Rakyat Gunungkidul III. Sifat Fisika Kayu. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 8(2) : 75–88.
- Nurjanah, I. 2020. Pemanfaatan Limbah Kayu Dalam Industri Kreatif Patung Kuda Di Yogyakarta. *Jurnal Studi Kultural*. 5(2) : 28-33.
- Nurraini L, Tabba, S. 2012. *Sifat Fisis Mekanis Kayu Pakoba Dan Penggunaannya Sebagai Jenis Endemik Lokal Sulawesi Utara*. Balai Penelitian Kehutanan. Manado.
- Oberhofnerová, E., Pánek, M., García-Cimarras, A. 2017: The Effect Of Natural Weathering On Untreated Wood Surface. *J. Maderas-Ciencia Tecnología*. 19 (2) :173–184.
- Patel, D dan Patel, M. 2014. Analisis Pengaruh Proses Pengukiran Laser Untuk Pengukuran Kekasaran Permukaan Pada Baja Tahan Karat. *Jurnal Internasional Penelitian Ilmiah dan Teknis*. 4 (3) : 725-730.
- Patel, S., Patel, S. B., and Patel, A. 2015. A Review On Laser Engraving Process. *International Journal for Scientific Research and Development*. 3(1) : 247-250.
- Petutschnigg, A., Stöckler, M., Steinwendner, F., Schnepf, J., Gütler, H., Blinzer, J., Holzer, H., dan Schnabel, T. 2013. Perawatan Laser Pada Permukaan Kayu Untuk Inti Ski: Studi Parameter Eksperimental. *Advances in Materials Science and Engineering*. 7 (6) : 1-7.
- Prihadianto, Bram, D., and Gesang, N. 2015. "Pengaruh Kecepatan Potong Pada Pemotongan Polymethyl Methacrylate Menggunakan Mesin Laser Cutting." *Seminar Nasional Teknologi*. Malang.
- Pritam, A. 2016. Experimental Investigation Of Laser Deep Engraving Process For AISI 1045 Stainless Steel By Fibre Laser. *International Journal of Information Research and Review*. 3 (1) : 1730-1734.
- Pudjiono. 2014. *Produksi Bibit Jati Unggul (Tectona grandis L.f.) Klon dan Budidayanya*. Institut Pertanian Bogor Press. Bogor.
- Kushartanto, Kabib, M., Winarso. 2019. Sistem Kontrol Gerak Dan Perhitungan Produk Pada Mesin Pres Dan Pemotong Kantong Plastik. *Jurnal Crankshaft*. 2 (1) :57-66.

- Sallata M. 2013. Pinus (*Pinus merkusii Jungh Et De Vriese*) Dan Keberadaannya Di Kabupaten Tana Toraja, Sulawesi Selatan. Info Teknis Eboni. Balai Penelitian Kehutanan Makassar. *J. Bulletin Eboni*. 10 (2): 85-98.
- Samosir, A., Batubara, R., Dalimunte, A. 2015. *Produktivitas Getah Pinus Merkusii (Pinus merkusii Merkusii Jungh Et De Vriese) Berdasarkan Ketinggian Tempat dan Konsentrasi Stimulansia Asam Cuka (C₂H₄O₂)*. Program Studi Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Santosa, G. 2010. *Pemanenan Hasil Hutan Bukan Kayu : Penyadapan Getah Pinus*. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Saputro, A dan Darwis, M. 2020. Rancang Bangun Mesin Laser Engraver and Cutter Untuk Membuat Kemasan Modul Praktikum Berbahan Akrilik. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*. 2 (1) 2020, 40-50, e-ISSN: 2654-251X.
- Sasmuko, Fithry, A., Mardjono, Darmo dan Tarjo. 2004. *Kuantifikasi Getah Tusam (Pinus merkusii) di Sumatera Utara*. Balai Penelitian dan Pengembangan Kehutanan Siantar. Siantar.
- Septiawan, Maulana, R., Nugroho, Naresworo, Bahtiar, dan Tri, E. 2018. Identifikasi Pengujian Sifat Fisis Mekanis dan Analisis Fatigue Lentur Kayu Pinus. IPB University. Bogor
- Simon, H. 2000. *Hutan Jati dan Kema kmuran: Problematika dan Strategi Pemecahannya*. Bigraf Publishing. Yogyakarta.
- Sitompul., H., F. 2019. *Analisis Vegetasi Tumbuhan Bawah Pada Tegakan Alam Pinus merkusii Jungh Et De Vriese Strain Tapanuli Di Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara*. Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan Fakultas Kehutanan Universitas Sumatera Utara. Medan
- Situmorang., R.O.P. dan Harianja., A.H. 2018. Tingkat Preferensi Masyarakat Mengelola Sagu di Kabupaten Asahan, Serta Faktor-Faktor yang Mempengaruhinya. *Jurnal Penelitian Sosial Dan Ekonomi Kehutanan*. 15(2):129–147.
- Somashekhar, Raju dan Hema, P. 2014. Agriculture Supply Chain Management a Scenario in India. *Jurnal Ekonomi Manajemen Sumber Daya*. 4 (7) : 89-99.
- Srinivas, K., Pandey, K. 2012: Effect Of Heat Treatment On Color Changes, Dimensional Stability, And Mechanical Properties Of Wood. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 32 (4): 304-316.

- Suhardiman dan Syaputra, M. 2017. Analisa Keausan Kampas Rem Non Asbes Terbuat dari Komposit Polimer Serbuk Padi dan Tempurung Kelapa. *Jurnal Inovtek Polbeng*. 7 (2) : 210-214.
- Sumarna, Y. 2012. *Kayu Jati: Panduan Budidaya dan Prospek Bisnis*. PT. PenebarSwadaya. Jakarta.
- Uzunovic, A., T. Byrne, M. Gicnac, Y. Dian-Qing. 2008. *Wood Dis colourations and their Prevention*. F.P. Innovations. Canada.
- Wahyudi. 2014. Karakteristik Dan Sifat-Sifat Dasar Kayu Jati Unggul 4 Dan 5 Tahun Asal Jawa Barat. *Jurnal. Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*. 19 (1) : 50-56.
- Wahyudi, I., Priadi, T., and Rahayu, I. 2014. Karakteristik dan Sifat-Sifat Dasar Kayu Jati Unggul Umur 4 dan 5 Tahun Asal Jawa Barat (*Characteristics and Basic Properties of 4 and 5 year-old of Superior Teakwoods from West Java*). *J. Ilmu Pertan. Indones*. 19 (1) : 50–56.
- Wahyudi, I. 2011. Peningkatan Mutu Kayu Hutan Rakyat dengan Teknik Pemadatan. *Jurnal Ilmu Kehutanan Tropis*. 8 (1) : 88-92.
- Wardani, Mulyanto, Kusuma, dan Dewi, D. 2016. *Pemberdayaan Usaha Kerajinan Tembaga Melalui Pengembangan Desain Dan Pelatihan Pembukuan*. Universitas Sebelas Maret Surakarta. Surakarta.
- Widiati, K., Suprpto, dan Tripratono., A. 2018. Karakteristik Sifat Fisika Dan Mekanika Kayu Lamina Kombinasi Jenis Kayu Sengon (*Paraserianthes Falcataria* (L.) Nilsen) Dan Jenis Kayu Merbau (*Intsia spp.*). *J Hut Trop*. 2 (2): 93-97.
- Widiatmaka, A., Mediranto, and Widjaja. 2015. Karakteristik, Klasifikasi Tanah, dan Pertumbuhan Tanaman Jati (*Tectona grandis* Linn f.) Var. Unggul Nusantara di Ciampea, Kabupaten Bogor. *J. Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 5 (1) : 87–97.
- Wien. 2012. *Bundesamt für W., sterreichische Waldinventur 2007-2009*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. Jerman.
- Wijaya, Dewa, K., Herwin, S., and Dony, S. 2020. Optimasi Proses Cutting Mesin CNC Router G-Weike WK1212 dengan Metode Full Factorial Design dan Optimasi Plot Multi Respon. *Jurnal Penelitian dan Aplikasi Sistem & Teknik Industri*. 14 (3) : 1-14.
- Xu, M., David, J. M. 2018. The Fourth Industrial Revolution : Opportunities and Challenges”, *International Journal of Financial Research*. 9 (2) : 90-95.