

**OPTIMASI PROSES TOREFAKSI MENGGUNAKAN *RESPONSE
SURFACE METHODOLOGY* (RSM) UNTUK MENINGKATKAN
KARAKTERISTIK PELET KALIANDRA**

Skripsi

Oleh

**PORTO MAURITIO
1914151086**



**JURUSAN KEHUTANAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

OPTIMASI PROSES TOREFAKSI MENGGUNAKAN *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY* (RSM) UNTUK MENINGKATKAN KARAKTERISTIK PELET KALIANDRA

Oleh

PORTO MAURITIO

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat fisis dan mekanis pelet kaliandra hasil torefaksi, serta mendapatkan suhu dan waktu tinggal optimum yang digunakan untuk mengoptimalkan torefaksi pelet kaliandra. Pelet ditorefaksi berdasarkan kombinasi suhu dan waktu yang telah direkomendasikan oleh *software design expert*. Sifat fisis dan mekanis yang diamati meliputi perubahan warna, kerapatan, dan kuat tekan. Hasil penelitian menunjukkan pelet berubah warna menjadi lebih gelap ditandai dengan nilai L^* yang meningkat serta nilai ΔE yang menurun seiring dengan kenaikan suhu dan lama waktu saat torefaksi. Kerapatan pelet setelah torefaksi berkisar antara $1,09 - 1,30 \text{ g/cm}^3$. Kekuatan tekan menurun seiring dengan kenaikan suhu dan lama waktu saat torefaksi. Suhu 240°C dengan waktu tinggal 30 menit menjadi kombinasi optimum dalam proses torefaksi pelet kaliandra. Kombinasi optimum ini didapatkan setelah melakukan verifikasi model menggunakan RSM (*Response Surface Methodology*) dengan hasil verifikasi berada pada kisaran 95% *Confident Interval* (CI) dan 95% *Prediction Interval* (PI).

Kata kunci: pelet, kaliandra, torefaksi, RSM (*Response Surface Methodology*).

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF THE TORREFACTION PROCESS USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM) TO IMPROVE THE CHARACTERISTICS OF KALIANDRA PELLETS

By

PORTO MAURITIO

This study aims to analyze the physical and mechanical properties of torrefaction calliandra pellets, as well as obtain the optimum temperature and residence time used to optimize the torrefaction of calliandra pellets. The torrefaction process is based on the combination of temperature and time recommended by a software design expert. The physical and mechanical properties observed included color change, density, and compressive strength. The results showed that the pellets changed color to become darker marked by an increase in L^ value and a decrease in ΔE value with increasing temperature and length of time during torrefaction. Pellet density after torrefaction ranged from 1.09 – 1.30 g/cm³. The compressive strength decreases with increasing temperature and the length of time during torrefaction. The temperature of 240°C with a residence time of 30 minutes is the optimum combination in the torrefaction of calliandra pellets. This optimum combination was obtained after verifying the model using RSM (Response Surface Methodology) with the verification results in 95% Confident Interval (CI) and 95% Prediction Interval (PI).*

Keywords: pellets, calliandra, torrefaction, RSM (Response Surface Methodology)

**OPTIMASI PROSES TOREFAKSI MENGGUNAKAN *RESPONSE
SURFACE METHODOLOGY* (RSM) UNTUK MENINGKATKAN
KARAKTERISTIK PELET KALIANDRA**

Oleh

PORTO MAURITIO

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

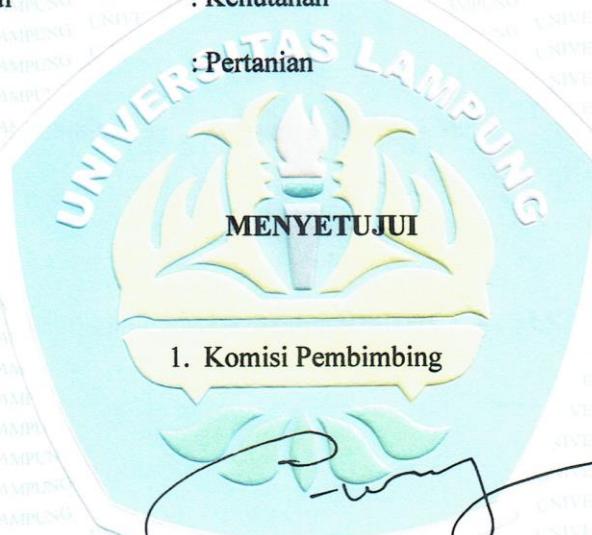
Judul Skripsi : **OPTIMASI PROSES TOREFAKSI
MENGUNAKAN *RESPONSE SURFACE
METHODOLOGY* (RSM) UNTUK
MENINGKATKAN KARAKTERISTIK
PELET KALIANDRA**

Nama Mahasiswa : **Porto Mauritio**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1914151086**

Program Studi : **Kehutanan**

Fakultas : **Pertanian**



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

2. Ketua Jurusan Kehutanan

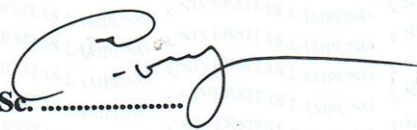
Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si.
NIP 197402222003121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua Komisi

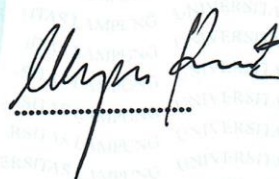
: Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.



Penguji Bukan Pembimbing : Duryat, S.Hut., M.Si.



Penguji Bukan Pembimbing : Dr. Melya Riniarti, S.P., M.Si.



2. Dekan Fakultas Pertanian



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 03 Februari 2023

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Porto Mauritio

NPM : 1914151086

Jurusan : Kehutanan

Alamat Rumah : Jalan Belimbing 2 Blok BB1 No.12 Sukatani Permai
Tapos Depok

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

“Optimasi Proses Torefaksi Menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) untuk Meningkatkan Karakteristik Pelet Kaliandra”

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

Bandar Lampung,
buat pernyataan



Porto Mauritio
NPM 1914151086

RIWAYAT HIDUP



Porto Mauritio lahir di Bogor, 09 Mei 2001 merupakan anak bungsu dari pasangan Bapak AAA Lajim Sitepu dan Ibu Marsiti Ariatyn. Penulis menempuh pendidikan di SD Maria pada tahun 2007-2013 kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Mardi Yuana Depok dari tahun 2013-2016 dan melanjutkan Pendidikan di SMA Mardi Yuana Depok pada tahun 2016-2019. Program Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) tahun 2019 menghantarkan penulis menjadi mahasiswa di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

Penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Jurusan Kehutanan (Himasyulva) sebagai anggota pada 2019-2022. Selama perkuliahan berlangsung, penulis pernah menjadi Asisten Praktikum mata kuliah Hidrologi pada tahun 2021. Penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sukmajaya, Kecamatan Sukmajaya, Depok pada tahun 2022. Penulis juga melaksanakan kegiatan Praktik Umum (PU) di Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Getas dan Wanagama selama 20 hari pada tahun 2022. Penulis telah mempublikasikan tulisan ilmiah di Prosiding Nasional Universitas Tadulako dengan judul “Pengaruh Variasi Suhu Torefaksi Terhadap Perubahan Warna Dan Sifat Fisik Pelet Kaliandra (*Calliandra Calothyrsus*)”.

“Janganlah hendaknya kamu kuatir tentang apa pun juga, tetapi nyatakanlah dalam segala hal keinginanmu kepada Allah dalam doa dan permohonan dengan ucapan syukur.”

Filipi 4: 6

SANWACANA

Puji syukur atas berkat dan anugerah Tuhan Yesus Kristus sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Optimasi Proses Torefaksi Menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) untuk Meningkatkan Karakteristik Pelet Kaliandra”. 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.
3. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing tunggal skripsi saya yang telah membimbing dengan penuh kesabaran, memberikan waktu, arahan, motivasi, serta nasihat kepada penulis hingga skripsi terselesaikan.
4. Bapak Duryat, S.Hut., M.Si. selaku dosen pembahas atas dukungan, kritik, dan saran dalam proses penyelesaian skripsi.
5. Ibu Dr. Melya Riniarti, S.P., M.Si. selaku dosen pembahas atas dukungan, kritik, dan saran dalam proses penyelesaian skripsi.
6. Bapak Ir. Indriyanto, M.P. selaku pembimbing akademik atas bimbingan dan motivasi yang diberikan selama penulis menempuh pendidikan sarjana di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
7. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah membimbing dan mendidik penulis selama menempuh masa studi.
8. Kedua orang tua tercinta Bapak AAA Lajim Sitepu dan Ibu Marsiti Ariatyn, serta kedua saudari penulis Klara Anna Pura Sitepu dan Gabriela Montela

Sitepu yang selalu memberikan kasih sayang, motivasi, dukungan materi, dan doa yang tiada henti sampai penulis menyelesaikan penulisan skripsi ini dengan baik.

9. Teman seperbimbingan Teknologi Hasil Hutan Lusy Rahmawati, Daffa Naufalian Fauzi, Hade Afkar, Ukhti Assyifa, M. Dimaz Nugraha, dan M. Alfaridzi 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. Teman dekat penulis Endra, Birgita, Vina, Dewi, Bagus, dan Karina atas segala bantuan, dukungan, dan motivasi yang diberikan.
 12. Keluarga besar Formics dan Himasylya Universitas Lampung.
 13. Semua pihak yang telah terlibat dalam penelitian dan penulisan skripsi
- Semoga Tuhan memberikan balasan atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

Bandar Lampung, 03 Februari 2023

Porto Mauritio

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Hipotesis	3
1.4. Kerangka Pemikiran.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Biomassa	6
2.2. Bioenergi.....	7
2.4. Densifikasi Biomassa.....	9
2.5. Pelet Kayu	12
2.6. Torefaksi	14
2.7. <i>Response Surface Methodology</i> (RSM)	15
III. METODE PENELITIAN	17
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian	17
3.2. Alat dan Bahan.....	17
3.3. Persiapan Bahan dan Perlakuan Pendahuluan	17
3.4. Proses Torefaksi.....	20
3.5. Pengujian Sifat Fisis	21
3.7. Optimasi dan Verifikasi Menggunakan Metode RSM.....	23
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1. Perubahan Warna	25
4.2. Kerapatan	34
4.3. Kuat Tekan.....	36
4.4. Optimasi dan Verifikasi Proses Torefaksi	39
V. SIMPULAN DAN SARAN	41
5.1. Kesimpulan	41
5.2. Saran	41

DAFTAR PUSTAKA.....	42
----------------------------	-----------

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Standar kualitas pelet kayu berdasarkan SNI 8021:2014.....	13
2. Perubahan kerapatan pelet kaliandra pada kering udara dan kering oven.....	34
3. Kriteria penentuan kombinasi optimum proses torefaksi pelet kaliandra	39
4. Respon verifikasi model kombinasi suhu dan waktu tinggal optimum	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran.	5
2. Desain percobaan pada <i>software design-expert</i> 13.	19
3. Pengisian <i>response</i> dalam desain percobaan.	19
4. Tabel data awal.	20
5. Skema torefaksi dengan <i>Electric Furnace</i> (EF).	21
6. Hasil pengujian sampel.	23
7. Analisis data.	24
8. Perubahan visual pelet kaliandra setelah torefaksi pada berbagai perlakuan suhu dan waktu tinggal.	25
9. Perubahan nilai L^* pada pelet kaliandra.	26
10. Grafik 3D dari nilai kecerahan (L^*) pelet kaliandra setelah torefaksi dengan kombinasi suhu dan waktu tinggal.	27
11. Perubahan nilai a^* pada pelet kaliandra.	28
12. Grafik 3D dari nilai kromatisasi merah/hijau (a^*) pelet kaliandra setelah torefaksi dengan kombinasi suhu dan waktu tinggal.	29
13. Perubahan nilai b^* pada pelet kaliandra.	30
14. Grafik 3D dari nilai kromatisasi kuning/biru (b^*) pelet kaliandra setelah torefaksi dengan kombinasi suhu dan waktu tinggal.	31
15. Perubahan warna total pelet kaliandra sesudah ditorefaksi dengan kombinasi suhu dan waktu tinggal.	32
16. Grafik 3D dari respon perubahan warna total pelet kaliandra setelah torefaksi dengan kombinasi suhu dan waktu tinggal.	33
17. Grafik 3D dari respon kerapatan pelet kaliandra setelah torefaksi dengan kombinasi suhu dan waktu tinggal.	36

Gambar	Halaman
18. Perubahan kuat tekan sebelum dan sesudah ditorefaksi dengan kombinasi suhu dan waktu tinggal.	37
19. Grafik 3D dari respon kuat tekan pelet kaliandra setelah torefaksi dengan kombinasi suhu dan waktu tinggal.	38

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pemanfaatan keanekaragaman hayati sebagai sumber energi alternatif terbarukan pengganti bahan bakar fosil yang saat ini sedang krisis merupakan pemanfaatan sumber daya secara bijak (Iryani *et al.*, 2019). Biomassa merupakan sumber energi alternatif yang layak karena selain melimpah dan terbarukan, biomassa juga merupakan sumber energi yang bersih (Qi., *et al.*, 2016). Menurut Kholiq (2015) krisis energi dapat dihindari dengan pengembangan sumber energi alternatif untuk memenuhi penggunaan energi dalam negeri. Istilah biomassa sendiri dapat diartikan sebagai produk organik yang tercipta dari hasil fotosintesis. Tumbuhan, limbah pertanian dan kehutanan, feses, serta kotoran hewan atau ternak adalah contoh biomassa (Parinduri dan Parinduri, 2020; Hidayat *et al.*, 2021a). Energi kimia yang dihasilkan dari biomassa disebut bioenergi (Reid *et al.*, 2020). Secara umum, biomassa masih digunakan di negara-negara berkembang sebagai sumber energi tradisional, khususnya sebagai kayu bakar untuk memasak dan menghangatkan. Sementara itu, energi biomassa digunakan sebagai sumber bahan bakar pembangkit listrik di negara maju (Nabila *et al.*, 2023; Sidabutar, 2017). Biomassa memiliki beberapa kekurangan antara lain kadar air tinggi, ukuran yang tidak seragam, densitas rendah, dan mudah terserang mikroba (Miao *et al.*, 2013). Sehingga diperlukan perlakuan untuk meningkatkan kualitasnya, yaitu dengan densifikasi (Rani *et al.*, 2020).

Densifikasi adalah cara mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar padat sehingga memiliki densitas dan potensi energi yang tinggi (Rustamaji, 2012). Salah satu bentuk konversi yang dihasilkan dari densifikasi yaitu pelet (Wibowo *et al.*, 2017). Pelet adalah material padat dari limbah kayu atau pertanian yang dihaluskan dan dipadatkan sehingga memungkinkan konsistensi serta efisiensi pembakaran

yang lebih baik dari keadaan aslinya (Hidayat *et al.*, 2020a; Sukarta, 2016). Berdasarkan Standar Nasional Indonesia 8021:2014, pelet kayu merupakan biomassa yang dimampatkan melalui panas dan tekanan, umumnya memiliki ukuran diameter 4–10 mm dan panjang lima kali diameter dengan kadar air maksimum 12%.

Bahan baku yang dibutuhkan untuk membuat wood pellet atau biomass pellet lainnya banyak tersedia di Indonesia. Kaliandra merupakan salah satu jenis tumbuhan yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pelet kayu (*Calliandra calothyrsus*) (Abdulah, 2019; Hendrati *et al.*, 2020). Kaliandra dinilai memiliki potensi karena mudah dibudidayakan, bijinya melimpah, dapat tumbuh di lahan komunal sehingga mudah dibudidayakan, dan cocok sebagai kayu energi karena kandungan kalorinya yang relatif tinggi (Hendrati *et al.*, 2014). Kaliandra sendiri merupakan spesies tumbuhan yang berasal dari Meksiko dan Amerika Tengah yang diperkenalkan ke Indonesia sekitar tahun 1936. Spesies ini sangat mudah tumbuh dan memiliki banyak manfaat seperti bahan pupuk hijau, pakan ternak, dan sumber biomassa. Tanaman ini termasuk spesies legum serbaguna (*multipurpose*) dan cepat tumbuh (*fast growing*) yang dapat memfiksasi nitrogen. Masyarakat pedesaan di banyak negara telah memanfaatkannya sebagai kayu bakar dan mulai diolah menjadi briket, pelet, atau arang (Hendrati *et al.*, 2020).

Pengembangan jenis bioenergi dari pelet berbahan kayu dapat diterapkan untuk menghasilkan energi terbarukan (Rubiyanti *et al.*, 2019). Namun pelet kayu umumnya memiliki kekurangan yaitu nilai ketahanan pakai dan densitas yang masih di bawah standar (Hidayat *et al.*, 2021b; Lestari *et al.*, 2018). Kekurangan tersebut dapat diatasi dengan melakukan torefaksi (Sulistio *et al.*, 2020). Proses termokimia atau disebut torefaksi digunakan untuk meningkatkan nilai kalor dan melemahkan kelemahan biomassa (Suastika, 2019). Banyak penelitian sebelumnya terkait torefaksi pelet biomassa, seperti yang dilakukan oleh Yulianto *et al.* (2020) dan Rani *et al.* (2020) yang melakukan torefaksi terhadap pelet tandan kosong kelapa sawit dan dari hasil penelitian ditemukan bahwa proses torefaksi mempengaruhi karakteristik pelet baik secara sifat fisis maupun kimia. Sementara itu berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, torefaksi terhadap pelet kaliandra masih sangat terbatas (Silalahi, 2020). Silalahi (2020) melakukan

torefaksi pelet kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) pada suhu 200°C, 230°C, 260°C dan 290°C selama 1 jam dan menunjukkan perubahan karakteristik serta terjadi peningkatan kualitas pelet. Penelitian terkait torefaksi pelet kaliandra menggunakan kombinasi dari variasi suhu dan waktu tinggal yang berbeda belum pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian ini sangat penting dilakukan untuk mengetahui pengaruh torefaksi dengan variasi suhu dan waktu terhadap perubahan karakteristik dan kualitas pelet kaliandra.

Dibutuhkan waktu dan penelitian lama untuk mengidentifikasi kombinasi dari parameter yang ideal untuk digunakan dalam torefaksi karena proses torefaksi dapat dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu waktu, suhu, dan jenis biomassa. Memanfaatkan perencanaan eksperimental berbasis statistik, seperti *Response Surface Methodology* (RSM) dapat memudahkan penelitian terkait torefaksi. RSM merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk memfasilitasi penelitian dan menentukan serangkaian parameter terbaik yang akan digunakan. Diketahui RSM adalah kombinasi dari teknik statistik dan matematika, dan digunakan untuk menganalisis masalah yang melibatkan beberapa variabel independen (faktor) yang mempengaruhi variabel tidak bebas (respon atau hasil) dan mengoptimalkan respon atau hasil. (Agustian *et al.*, 2021).

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

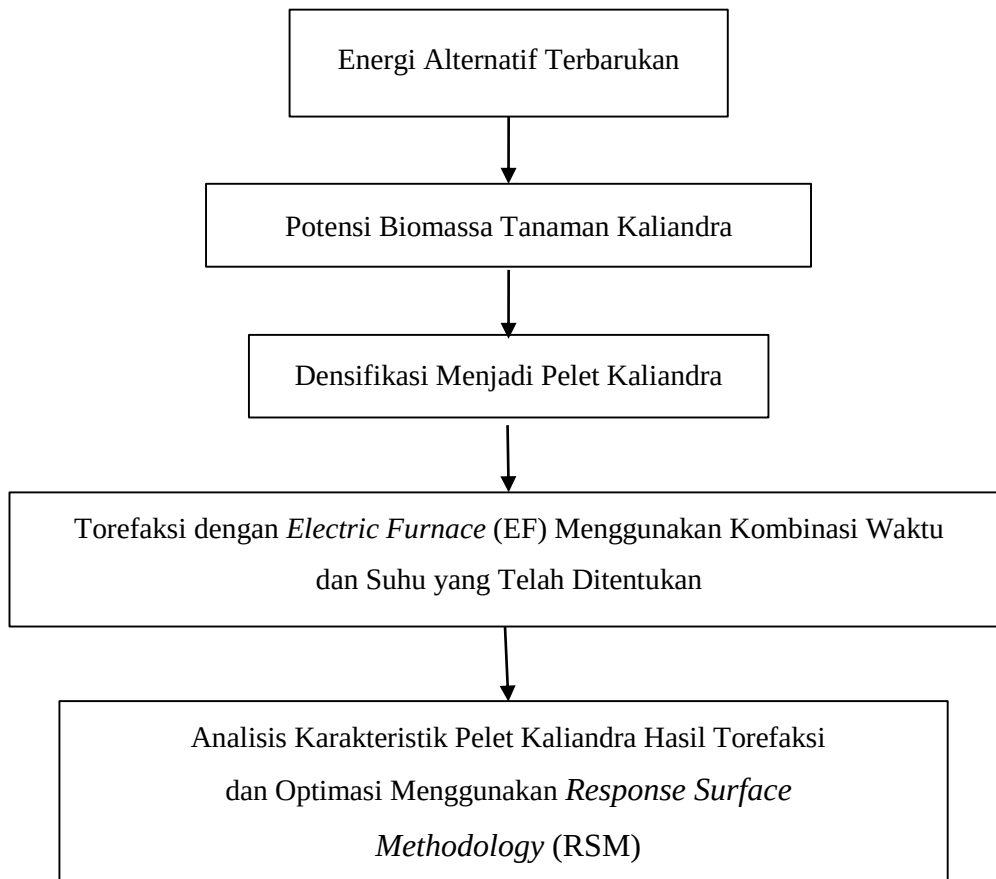
1. Menganalisis sifat fisis dan mekanis pelet kaliandra setelah dilakukan torefaksi menggunakan *Electric Furnace* (EF) dengan kombinasi dari variasi suhu dan waktu tinggal.
2. Mendapatkan suhu dan waktu tinggal optimum untuk digunakan dalam mengoptimalkan torefaksi pelet kaliandra menggunakan RSM.

1.3. Hipotesis

Semakin tinggi suhu dan semakin lama durasi waktu dalam proses torefaksi akan meningkatkan karakteristik serta kualitas pelet kaliandra.

1.4. Kerangka Pemikiran

Indonesia memiliki potensi yang signifikan untuk memanfaatkan energi biomassa karena keanekaragaman hayatinya yang tinggi. Salah satu biomassa yang berpotensi untuk diubah menjadi wood pellet adalah kaliandra. Khusus untuk pembuatan pelet, tanaman ini dapat menghasilkan energi, bahan baku yang cepat dan berkualitas. Setelah menjadi pelet kayu, perlu adanya perlakuan tambahan guna meningkatkan karakteristik yang terdapat pada pelet kayu tersebut. Torefaksi menggunakan EF menjadi salah satu cara dalam meningkatkan karakteristik pelet kaliandra agar energi yang dihasilkan akan lebih maksimal. Waktu, suhu, dan tipe biomassa menjadi parameter yang dapat mempengaruhi proses torefaksi, sehingga untuk menemukan kombinasi optimum dari parameter tersebut diperlukan sebuah metode eksperimen berbasis statistika seperti RSM. Metode ini dapat digunakan untuk mengetahui hasil optimasi torefaksi pelet kaliandra dengan beberapa parameter seperti waktu dan suhu. Berdasarkan uraian tersebut dapat dilihat kerangka penelitian yang telah disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa

Bahan organik yang dikenal sebagai biomassa dibuat selama fotosintesis dan dapat ditemukan baik dalam bentuk yang dapat digunakan maupun sampah. Sumber energi yang dihasilkan dari biomassa dapat diolah untuk menjadikannya sebagai sumber energi yang lebih berkelanjutan (Parinduri dan Perenduri, 2020). Limbah kayu, sekam padi, jerami, ampas tebu, tempurung kelapa dan sawit, kotoran ternak, dan sampah kota merupakan beberapa contoh biomassa yang dapat kita manfaatkan untuk menghasilkan energi (Hidayat *et al.*, 2022a; Putri dan Andasuryani, 2017). Komponen kimia umum yang terdapat pada biomassa adalah hidrogen (H), karbon (C), oksigen (O), belerang (S), nitrogen (N), abu, arang, dan air (Wijaya *et al.*, 2022). Semua komponen ini digabungkan menjadi satu senyawa kimia (Haryanto, 2021a; Ridhuan *et al.*, 2019).

Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar bukanlah hal baru. Saat ini kayu bakar berbahan biomassa masih banyak dimanfaatkan (Haryanto, 2021b; Rafly *et al.*, 2022). Kebutuhan rumah tangga, pengeringan hasil pertanian atau kayu industri, dan pembangkit listrik merupakan contoh kegiatan yang memanfaatkan energi yang dihasilkan dari biomassa (Syamsiro dan Saptoadi, 2007). Berdasarkan siklus karbon dasar dan proses fotosintesis, sumber daya biomassa dapat digunakan berulang kali dan tidak terbatas (Haryanto, 2021c). Berbeda bila dibandingkan dengan sumber daya fosil yang secara inheren bersifat sementara dan terbatas. Selain itu, iklim global akan sangat terpengaruh oleh emisi CO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil (Yokoyama dan Matsumura, 2008).

Saat ini, ada berbagai cara untuk mengubah biomassa menjadi energi. Jenis dan jumlah biomassa, bentuk energi yang diinginkan, permintaan pasar, norma lingkungan, dan kondisi ekonomi semuanya berdampak pada teknik produksi

(Mckendry, 2002). Biokimia dan termokimia biasanya digunakan sebagai dua proses untuk mengubah biomassa menjadi energi. Ada tiga pilihan untuk metode termokimia: gasifikasi, pirolisis, dan pembakaran (Haryanto *et al.*, 2022; Hidayat *et al.*, 2017b; Riniarti *et al.*, 2021). Jenis dasar biomassa adalah bahan bakar padat, yang dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi. Proses pirolisis dapat menghasilkan bahan bakar cair, sedangkan proses gasifikasi dapat menghasilkan bahan bakar gas (Syamsiro, 2016). Berbeda dengan pendekatan biokimia yang menggunakan bakteri atau enzim untuk memecah biomassa menjadi molekul yang lebih kecil, metode biokimia menggunakan biomassa untuk menghasilkan energi. Meskipun prosesnya sangat lambat, namun diperlukan sedikit daya dari luar. Teknik biokimia untuk mengkonversi biomassa meliputi pendinginan dan hidrolisis enzimatis (Basu, 2010).

2.2. Bioenergi

Indonesia memiliki sumber energi terbarukan yang potensial, energi tersebut dihasilkan dari biomassa dan biasa disebut bioenergi. Bioenergi adalah energi yang berasal dari bahan organik dan dapat dikonversi menjadi tiga bentuk yaitu biofuel, biogas, dan biomassa padat (Dharmawan *et al.*, 2018). Bioenergi belum sepenuhnya dikatakan sebagai energi bersih, dikarenakan beberapa proses produksinya yang masih memberikan efek terhadap lingkungan. Namun jika dibandingkan dengan energi fosil, bioenergi jauh lebih ramah lingkungan (Mc Bride *et al.*, 2011; Sedjo, 2011; Araujo, 2014).

Produksi minyak nasional mencapai puncaknya pada tahun 2000-an, namun hingga tahun 2025 diperkirakan akan turun. Keamanan energi berada di bawah bahaya mengingat keadaan bangsa saat ini. Sejak tahun 2007, Indonesia mulai mengimpor minyak bumi, dan hingga tahun 2025 diperkirakan akan terus meningkat. Hal ini dilakukan untuk mengatasi masalah ketahanan energi (BPPT, 2016). Dalam situasi ini, bioenergi merupakan sumber energi baru terbarukan yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif untuk mengurangi permintaan impor dan mengatasi risiko ketahanan energi (Dutu, 2016).

Pengembangan bioenergi dapat digunakan sebagai alat untuk mengelola harga komoditas, contohnya produk pertanian (Agustian *et al.*, 2015). Bioenergi

juga hadir sebagai solusi untuk meningkatkan perekonomian nasional melalui pembangunan pertanian. Permintaan bahan baku bioenergi dapat mendorong peningkatan produksi biomassa dari sumber daya dalam negeri. Hal inilah yang mendorong pertumbuhan industri bioenergi dan meningkatkan kesempatan kerja, pendapatan pemerintah, dan pertumbuhan ekonomi (Dharmawan *et al.*, 2018). Bioenergi modern bergantung pada konversi teknologi yang efektif untuk penggunaan komersial, industri, dan rumah tangga. Masukan biomassa, baik padat maupun cair, dapat diubah menjadi energi yang lebih praktis. Termasuk biofuel gas (biogas, gas sintesis, dan hidrogen), biofuel cair, dan biofuel padat (kayu bakar, serpihan kayu, pelet, arang, dan briket) (GBEP, 2007). Tiga produk sampingan utama bioenergi modern adalah etanol, biodiesel, dan biogas. Biodiesel dan etanol dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk kendaraan. Sehingga berdasarkan pertimbangan ekonomi, ketahanan pangan, dan lingkungan, pembuatan etanol sangat penting untuk konversi minyak bumi menjadi biomassa (Sari dan Hidayanto, 2013).

2.3. Kaliandra

Salah satu anggota famili leguminosae, kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) merupakan tumbuhan yang berpenampilan seperti pohon atau perdu kecil (Trisnadewi dan Cakra, 2015). Kaliandra biasanya tumbuh dengan tinggi antara 4-6 meter, namun tanaman ini dapat tumbuh hingga setinggi 12 meter dan memiliki diameter batang hingga 30 cm. Kaliandra memiliki daun berwarna hijau tua, dan tajuknya yang lebat memanjang ke samping. Daun kaliandra memiliki tipe majemuk berpasangan (Utomo dan Suwignyo, 2015).

Berikut ini merupakan taksonomi dari tanaman kaliandra.

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Magnoliophyta
Class	: Magnoliopsida
Famili	: Fabaceae/Leguminosae
Genus	: Calliandra
Spesies	: <i>Calliandra calothyrsus</i> Meissn.

Sekitar tahun 1936 benih tanaman kaliandra mulai diperkenalkan dari Amerika Selatan ke Indonesia. Tanaman ini tumbuh sangat baik di Indonesia karena memiliki viabilitas hidup yang tinggi dan memiliki kemampuan untuk hidup di berbagai jenis tanah. Varietas tanaman kaliandra berbunga merah banyak tumbuh di Indonesia. Kaliandra merupakan tanaman yang memiliki berbagai fungsi yang ditunjukkan oleh batang dan daunnya yang bermanfaat (Hendrati dan Hidayati, 2014). Kemampuan tanaman ini untuk memfiksasi nitrogen membuatnya berguna untuk meningkatkan kesuburan tanah juga. Selain itu tanaman ini tahan api dan menyediakan nektar bagi lebah (Febijanto, 2018). Untuk pertumbuhan sumber biomassa, kaliandra merupakan jenis tanaman yang sedang dikembangkan.

Kaliandra dapat dimanfaatkan sebagai sumber biomassa dan dijadikan pelet, karena kaliandra memiliki kandungan lignin yang relatif tinggi, sehingga perekatan pelet akan lebih murah dan potensi panasnya akan lebih tinggi. Selain itu kaliandra dianggap lebih praktis karena dapat menggunakan kayu dengan ukuran kecil sehingga mudah untuk diekspor (Hendrati dan Hidayati, 2014; Siregar *et al.*, 2020).

2.4. Densifikasi Biomassa

Densifikasi biomassa adalah proses mekanis dan teknologi yang diakui serta semakin populer. Prosedur densifikasi biomassa yang paling awal dipatenkan tercatat di Chicago pada tahun 1880 oleh William Harold Smith (Stelte, 2011). Transformasi biomassa untuk bahan bakar padat dengan kepadatan tinggi adalah untuk menjelaskan masalah yang ditimbulkan oleh limbah padat dan ketergantungan yang tinggi pada kayu sebagai bahan bakar di negara berkembang (Akande dan Olorunnisola, 2018; Tembe *et al.*, 2014).

Secara umum biomassa mempunyai kekurangan yaitu densitas rendah, ukuran yang tidak teratur, kandungan volatile tinggi, nilai kalor yang rendah dan efisiensi pembakaran yang rendah (Crawford *et al.*, 2015; Sedlmayer *et al.*, 2018; Pimchuai *et al.*, 2010). Kekurangan tersebut menyulitkan biomassa untuk digunakan sebagai bahan bakar. Salah satu cara untuk meningkatkan densitasnya adalah dengan densifikasi (Syamsiro, 2016). Densifikasi adalah proses pemadatan biomassa dengan cara pengempaan (penekanan) sehingga kerapatan atau densitasnya meningkat (Hartono *et al.*, 2016; Rustamaji, 2012).

Tekanan densifikasi membuat partikel biomassa saling mengunci dan menempel selama penanganan, transportasi, dan pembakaran. Proses tersebut meliputi pembriketan (*briquetting*), peletisasi (*pelletizing*), pengkubusan (*cubing*), dan pemadatan atau pengemasan biomassa di lahan pertanian (*baling*) (Akogu dan Waheed 2019; Bazenet *et al.*, 2017; Ridjayanti *et al.*, 2021). Saat ini, bahan baku yang digunakan untuk densifikasi sebagian besar adalah residu kayu (serpihan kayu, serutan kayu, dan serbuk gergaji), rumput (residu biji-bijian atau tanaman energi), dan residu pertanian yang meliputi limbah pertanian, industri, serta agro-residu. Ketika biomassa mentah dibandingkan dengan produk densifikasi, biomassa mentah menunjukkan efisiensi termal yang rendah, efisiensi pembakaran yang buruk, kadar air yang tinggi, nilai kalor yang rendah, kepadatan energi yang rendah, emisi asap yang tinggi, ukuran dan bentuk yang tidak seragam, dan menghasilkan debu yang menimbulkan risiko kesehatan bagi orang-orang di sekitarnya (Ibitoye *et al.*, 2021).

Proses densifikasi biomassa yang paling umum adalah briket dan peletisasi (Ibitoye *et al.*, 2021). Briket merupakan salah satu proses densifikasi yang digunakan untuk pembuatan bahan bakar padat (Karunanithy *et al.*, 2012). Tekanan mekanis yang tinggi membuat partikel bahan baku saling terjepit dan merekat, sehingga briket tidak akan hancur selama proses penyimpanan, pembakaran, dan pengangkutan (Promdee *et al.*, 2017). Proses pembuatan briket dapat dilakukan dengan atau tanpa perekat. Bahan perekat ditambahkan apabila bahan baku biomassa tidak memiliki perekat alami. Beberapa bahan yang digunakan sebagai pengikat antara lain tanah liat, kanji, kapur magnesia, tar, pitch, resin, dan semen (Zubairu dan Gana, 2014). Pembuatan briket dapat dilakukan dengan atau tanpa aplikasi panas. Penerapan panas sebagian besar waktu meningkatkan kekuatan mekanik produk akhir (Alhassan dan Olaoye, 2015). Parameter operasi yang dipertimbangkan selama pembuatan briket termasuk tekanan, waktu tinggal, dan suhu, sedangkan parameter bahan baku meliputi kadar air, ukuran bentuk partikel, dan aditif eksternal (Oladeji, 2010).

Parameter-parameter tersebut dapat dioptimalkan sehingga dapat dihasilkan briket yang berkualitas baik. Suhu dan tekanan briket optimum masing-masing berkisar antara 100°C hingga 250°C dan 50–250 MPa, sedangkan waktu tinggal

optimum adalah antara 4 dan 25 menit (Stelte, 2011; Ahiduzzaman dan Sadrul, 2013). Briket yang berhasil dan efektif membutuhkan bahan baku dengan kisaran kadar air 5–15% dan ukuran partikel berkisar 1–10 mm (Mopoung dan Udeye, 2017; Maia *et al.*, 2014).

Proses densifikasi biomassa selanjutnya yaitu peletisasi, proses ini telah diadopsi sebagai pengelolaan limbah biomassa untuk memproduksi bahan bakar padat (Ibitoye *et al.*, 2021). Produksi pelet dengan sifat fisiko-mekanik yang baik sangat bergantung pada dua parameter penting yaitu parameter proses dan bahan baku. Distribusi ukuran partikel, kadar air, dan distribusi bahan campuran yang homogen merupakan parameter bahan baku yang penting. Parameter bahan baku secara signifikan mempengaruhi sifat pelet. Bahan baku dengan distribusi partikel yang rapat kemungkinan akan menghasilkan pelet dengan densitas tinggi. Produksi pelet pada kadar air optimum biasanya menghasilkan pelet dengan karakteristik yang baik. Sementara itu parameter proses yang paling penting adalah tekanan kompresi dan suhu (Kirsten *et al.*, 2016).

Setiap bahan baku yang dipertimbangkan untuk produksi pelet harus memiliki kandungan energi yang cukup. Kandungan energi bahan baku diukur dalam hal kepadatan energi yaitu energi per satuan berat atau volume. Kepadatan energi per satuan volume bahan baku adalah signifikan mengingat volume bahan baku yang dibutuhkan untuk digunakan dalam proses konversi energi. Bahan baku dengan densitas energi yang lebih tinggi membutuhkan volume bahan baku yang lebih sedikit untuk menghasilkan pelet dengan jumlah kandungan energi tertentu (Zych, 2008).

Berdasarkan Lestari (2009), langkah dasar proses densifikasi biomassa menjadi pelet meliputi:

1. Sortasi Bahan Baku (*Raw Materials Sorting*)

Bahan baku mentah terlebih dahulu dipisahkan dari material pengotor berat seperti logam dan batu agar tidak mengganggu proses densifikasi biomassa.

2. Penumbukan (*Comminution*)

Bahan yang telah disortir akan dihancurkan dengan mesin penghancur. Ukuran partikel maksimum harus disesuaikan dengan ukuran pelet yang akan dihasilkan.

3. Pengeringan (*Drying*)

Biomassa harus dikeringkan terlebih dahulu dengan pengering hingga memiliki kadar air sekitar 8–10% jika bahan mentahnya basah (sering diperoleh dari sisa hutan, dengan kadar air sekitar 50%).

4. Pengkondisian (*Conditioning*)

Bahan baku dapat dipanaskan pada suhu yang tepat sehingga kandungan air dalam biomassa mengaktifkan lignin, yang berfungsi sebagai perekat alami pelet dan memberikan kekuatannya. Penambahan komponen perekat organik tergantung pada standar yang diinginkan.

5. Peletisasi (*Pelletizing*)

Setelah fase persiapan, konveyor digunakan untuk memindahkan partikel ke dalam mesin pelet, pelet kemudian dipotong sesuai panjang yang diperlukan. Ada dua jenis pengepres pelet: *flat die* dan *ring die press*.

6. Pendinginan (*Cooling*)

Pelet harus didinginkan sebelum dikemas dan disimpan karena akan menjadi sangat panas setelah proses pembuatan pelet, suhunya bisa mencapai 100°C.

7. Penyaringan (*Sieving*)

Kotoran dipisahkan dari pelet dengan penyaring. Kemudian, pelet yang sudah bersih dipindahkan ke tempat penyimpanan atau pengepakan.

2.5. Pelet Kayu

Biofuel yang dihasilkan dari bahan organik yang terkompresi adalah pelet kayu (Amirta, 2018; Pah *et al.*, 2021). Proses pembuatan pelet kayu melibatkan pengumpanan bahan baku secara terus menerus. Cincin baja akan mendorong dan memampatkan bahan kering dalam beberapa lubang dengan ukuran tertentu sebelum memotongnya sesuai panjang yang diinginkan (Wibowo dan Arief, 2020). Salah satu inovasi bioenergi yang dapat menyediakan energi terbarukan dan berkelanjutan adalah pelet kayu (Rubiyanti *et al.*, 2019). Pelet kayu saat ini menjadi perhatian utama karena manfaat lingkungannya dan kemudahan akses ke sumber daya mentah. Selain itu, dibandingkan dengan limbah pertanian seperti jerami atau sekam padi, pelet kayu menghasilkan lebih sedikit NO_x, SO_x, dan HCL (Passalacqua dan Zaetta, 2004). Penerimaan bahan baku, penyaringan,

penggilingan, pengeringan, pembuatan pelet, pendinginan, penyaringan, standarisasi, dan pengemasan adalah semua langkah dalam produksi pelet kayu. (USDA, 2012). Jika dibandingkan dengan kayu bakar, pelet kayu memiliki keunggulan sebagai berikut: mudah ditangani, mudah dinyalakan dan dibakar, memiliki sifat dan bentuk bahan bakar yang seragam, mengeluarkan asap yang kurang berbahaya selama pembakaran, diangkut secara efisien, dan memiliki kepadatan energi yang tinggi (Yokoyama dan Matsumura, 2008).

Berdasarkan Giyanto (2020), pelet kayu memiliki beberapa kelebihan seperti:

1. Harganya lebih murah dan relatif stabil jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil.
2. Memiliki energi konten yang tinggidi berkisar 3.400 -4.880 kkal/kg.
3. Dapat dikatakan teknologinya lebih efisien jika disandingkan dengan bahan bakar biomassa lain.
4. Penggunaanya mudah dan nyaman.
5. Efektif digunakan sebagai bahan bakar rumah tangga sampai sektor industri.

Meningkatnya permintaan pelet kayu dan krisis energi global yang sedang berlangsung, Indonesia, negara dengan sumber daya hutan yang melimpah, mungkin dapat mengekspor pelet kayu di masa depan (Simanungsong *et al.*, 2017). Khusus untuk usaha kecil dan menengah yang sebelumnya menggunakan bahan bakar yang berasal dari limbah kayu, wood pellet sebagai bahan bakar terbarukan saat ini mulai diperkenalkan sebagai bahan bakar alternatif (Hidayat *et al.*, 2022b; Sylviani, 2013). Indonesia turut membuat standarisasi yang digunakan dalam mengakomodasi perkembangan pasar dan teknologi di industri pelet kayu. Standar tersebut tertera dalam SNI 8021:2014 yang berjudul “Pelet Kayu” (Tabel 1).

Tabel 1. Standar kualitas pelet kayu berdasarkan SNI 8021:2014

No	Parameter	Satuan	Persyaratan
1.	Kerapatan	g/cm ³	Min. 0,8
2.	Kadar abu	%	Maks. 1,5
3.	Zat yang mudah menguap/bagian yang hilang	%	Maks. 80
4.	Kadar karbon	%	Min. 14
5.	Nilai kalor	Kal/g	Min 4.000

2.6. Torefaksi

Proses termal yang dikenal dengan torefaksi dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas dan karakteristik biomassa (Rubiyanti *et al.*, 2019). Dalam proses termokimia yang disebut torefaksi, biomassa dipanaskan secara bertahap selama waktu tertentu pada suhu 200–300°C. Proses tersebut dilakukan dalam kondisi sedikit atau tanpa udara (*inert*), sehingga komponen hemiselulosa terdegradasi (Susanty *et al.*, 2019). Selama torefaksi, biomassa mengalami reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi, dimana oksigen dipindahkan dalam bentuk CO₂, CO, air, asam asetat, dll.

Jenis biomassa, suhu torefaksi, waktu torefaksi, dan ukuran partikel biomassa hanyalah sebagian kecil dari karakteristik operasional yang mempengaruhi bagaimana biomassa mengalami torefaksi (Surono, 2021). Gas volatil akan bertambah sebagai hasil dari degradasi hemiselulosa, lignin, dan selulosa akibat meningkatnya suhu saat torefaksi (Chen dan Kuo, 2011). Perlakuan panas pada suhu yang tinggi dapat menurunkan massa akibat hilangnya hemiselulosa dan melunaknya lignin (Hidayat *et al.*, 2015; Hidayat *et al.*, 2016; Hidayat dan Febrianto, 2018). Pemecahan selulosa dan lignin akan terjadi setelah pemecahan hemiselulosa (Chen dan Kuo, 2010). Perlakuan panas tidak hanya mengubah struktur serat tetapi juga kualitas biomassa, menjadikannya metode pengolahan yang ramah lingkungan untuk meningkatkan kualitas fisik dan kimia, sehingga produk memiliki nilai tambah (Hidayat *et al.*, 2017a).

Proses torefaksi pelet biomassa dapat menghasilkan hidrofobisitas yang lebih tinggi, atau kecenderungan menyerap air yang rendah, dan dapat menghindari serangan jamur atau mikroba selama penyimpanan dan dapat meningkatkan nilai kalor (Alamsyah *et al.*, 2017; Tumuluru *et al.*, 2011). Kandungan air akan dilepaskan selama proses torefaksi, dan proses devolatilisasi kecil akan berlangsung selama perlakuan panas, yang akan melepaskan bahan yang mudah menguap. Proses ini akan mengakibatkan penurunan massa dan kandungan air tetapi meningkatkan kandungan energi dan nilai kalor per satuan massa secara keseluruhan (Bergman, 2005).

Ada banyak alat teknologi yang dapat digunakan untuk torefaksi, termasuk tanur listrik. Tanur listrik merupakan alat pemanas yang dapat mengubah bentuk

suatu material sehingga dapat melalui proses *rolling* dan *forging* atau mengubah sifat material melalui perlakuan panas (Rizal *et al.*, 2016). Berdasarkan penelitian Yulianto *et al.* (2020) tungku listrik dapat digunakan sebagai alat untuk melakukan torefaksi, pada penelitian tersebut digunakan tungku listrik untuk melakukan torefaksi terhadap pelet tandan kosong kelapa sawit dengan suhu 280°C selama 20 menit.

2.7. Response Surface Methodology (RSM)

Berbagai disiplin ilmu dan industri memberi nilai tinggi pada desain eksperimental. Metode ilmiah didasarkan pada pengukuran satu atau lebih reaksi, dan percobaan adalah pemberian perlakuan pada unit percobaan. Dalam mendapatkan hasil yang diinginkan, seorang pelaku eksperimen harus merancang eksperimen, menyusun eksperimen, melakukan eksperimen, dan menganalisis data. *Response Surface Methodology* (RSM) adalah salah satu desain eksperimental paling populer untuk pengoptimalan. Teknik ini memungkinkan untuk menganalisis dampak dari beberapa variabel dan bagaimana mereka berinteraksi dengan satu atau lebih respon variabel (Aydar, 2018).

RSM adalah teknik pemodelan dan analisis yang populer ketika jawaban yang diinginkan dipengaruhi oleh sejumlah variabel. RSM menggabungkan metodologi matematika dan statistik (Refinery dan Braima, 2016). Montgomery (2005), menjelaskan bahwa tujuan dari metode ini adalah untuk mengoptimalkan respons. RSM menemukan keadaan operasi yang ideal untuk sistem yang sedang dipertimbangkan atau area faktor lapangan yang memenuhi persyaratan operasi dengan hubungan perkiraan yang tepat antara variabel input dan output (Farooq *et al.*, 2013). Dua desain eksperimental utama yang digunakan dalam teknik permukaan respon adalah *Box-Behnken Design* (BBD) dan *Central Composite Design* (CCD). Baru-baru ini, studi pengoptimalan juga telah menggunakan *Central Composite Rotatable Design* (CCRD) dan *Face Central Composite Design* (FCCD) (Aydar, 2018).

RSM memiliki beberapa manfaat, termasuk kemampuan untuk mengontrol bagaimana variabel independen berinteraksi satu sama lain, pemodelan matematis sistem, dan penghematan waktu dan uang dari uji coba yang lebih sedikit (Boyaci,

2005). Kelemahan yang paling penting dari metode RSM ini adalah bahwa data eksperimen dipasang pada model polinomial pada tingkat kedua. Tidak benar untuk mengatakan bahwa semua sistem dengan kelengkungan kompatibel dengan model polinomial orde kedua. Selain itu, verifikasi eksperimental dari nilai estimasi dalam model harus dilakukan secara mutlak (Koç dan Kaymak, 2010).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober-November 2022. *Workshop* Laboratorium Teknologi Hasil Hutan Universitas Lampung digunakan sebagai tempat untuk mempersiapkan bahan dan melakukan torefaksi. Sementara itu Laboratorium Teknologi Hasil Hutan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian digunakan untuk pengujian sifat fisik dan mekanik.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain jangka sorong digital (skala 0,01 mm), timbangan elektrik (skala 0,0001 g), *Electric Furnace* (EF) (BJPX - Summer, PT. Innotech System, Jakarta, Indonesia), colorimeter, *universal testing machine* (M500-50AT, Testometric, Rochdale, United Kingdom), dan *software design-expert* 13. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelet kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) dan *aluminium foil*.

3.3. Persiapan Bahan dan Perlakuan Pendahuluan

3.3.1. Penyaringan dan Penyortiran

Penyaringan terhadap pelet kaliandra dilakukan guna memisahkan pelet dengan debu dan serbuk dari sisa pelet. Dilakukan penyortiran pelet kaliandra berdasarkan ukuran sampel sebesar 4-5 cm. Pelet selanjutnya dikeringkan menggunakan *Electric Furnace* (EF) pada suhu 100°C selama 24 jam. Pengeringan dilakukan untuk menguapkan air selama penyimpanan dan membuat pelet menjadi

kering oven. Selanjutnya sampel pelet tersebut disimpan menggunakan kontainer plastik untuk menjaga pelet dari kelembaban udara.

3.3.2. Perancangan Desain Percobaan

Design-expert adalah perangkat lunak statistik yang dikembangkan oleh lembaga pemerintah untuk memfasilitasi pelaksanaan desain eksperimental, seperti mengidentifikasi formula persiapan yang ideal. Perangkat lunak ini awalnya tersedia pada tahun 1996 dan dapat menginterpretasikan faktor-faktor eksperimental selain mengoptimalkan.

Sebelum dilakukan proses torefaksi, terlebih dahulu menentukan parameter waktu dan suhu yang ingin digunakan dalam melakukan torefaksi. Kemudian ditetapkan batas bawah dan atas dari kedua faktor tersebut yaitu untuk waktu digunakan batas bawah sebesar 20 menit dan batas atas sebesar 50 menit. Sedangkan untuk suhu digunakan 200°C sebagai batas bawah dan 280°C sebagai batas atas. Setelah menetapkan batas bawah dan batas atas dari faktor tersebut, dilakukan pembuatan desain percobaan menggunakan *software design-expert*.

Berdasarkan Gambar 2 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 suhu (°C) dan waktu tinggal (menit). 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 categoric factors are added, the central composite design will be duplicated for every combination of the categoric factor levels.

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

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

	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A [Numeric]	Suhu	Derajat C	200	280	183.431	296.569
B [Numeric]	Waktu Tingg	Menit	20	50	13.7868	56.2132

Type: Blocks:

Gambar 2. Desain percobaan pada *software design-expert* 13.

Setelah itu kolom *responses* ditentukan berdasarkan jumlah respon yang ingin dilakukan setelah melakukan torefaksi. Kolom *name* pada Gambar 3 merupakan jenis respon yang ingin dilakukan, sementara kolom *units* merupakan satuan dari respon tersebut.

Central Composite Design

Responses: (1 to 999) ☒ Horizontal ☐ Vertical

	Name	Units
	Nilai Kecerahan (L*)	
	Kromatisasi merah/hijau (a*)	
	Kromatisasi kuning/biru (b*)	
	Perubahan warna total (Delta E)	
	Kerapatan	g/cm3
	Kuat tekan	N/mm3

Gambar 3. Pengisian *response* dalam desain percobaan.

Setelah selesai menginput data yang diperlukan klik *finish* hingga muncul tabel data awal. *Software* akan memberikan rekomendasi penggunaan suhu dan waktu yang akan digunakan dalam proses torefaksi. Penelitian ini menggunakan kombinasi suhu 200°C, 220°C, 240°C, 260°C, dan 280°C dengan waktu 20 menit, 30 menit, 40 menit, dan 50 menit dapat dilihat pada Gambar 4.

	Std	Run	Factor 1 A:Suhu Derajat C	Factor 2 B:Waktu Tinggal Menit	Response 1 Nilai Kecerahan ...	Response 2 Kromatisasi mer...	Response 3 Kromatisasi kuni...	Response 4 Perubahan warn...	Response 5 Kerapatan g/cm3	Response 6 Kuat tekan N/mm3
	6	1	200	20						
	13	2	200	30						
	9	3	200	40						
	8	4	200	50						
	3	5	220	20						
	11	6	220	30						
	1	7	220	40						
	4	8	220	50						
	2	9	240	20						
	10	10	240	30						
	12	11	240	40						
	5	12	240	50						
	7	13	260	20						
	14	14	260	30						
	15	15	260	40						
	16	16	260	50						
	17	17	280	20						
	18	18	280	30						
	19	19	280	40						
	20	20	280	50						
	21	21	200	20						
	22	22	200	30						
	23	23	220	20						
	24	24	220	40						
	25	25	240	30						

Gambar 4. Tabel data awal.

Penginputan data *response* dilakukan setelah melakukan torefaksi menggunakan EF dengan kombinasi suhu dan waktu yang telah ditentukan pada tabel data awal.

3.4. Proses Torefaksi

Sebanyak 12 batang pelet kaliandra dengan ukuran 3-4 cm dan berat ± 3 g dibungkus dengan *aluminium foil* berbentuk persegi dengan panjang sisi 25 cm. Selanjutnya *aluminium foil* dilubangi menggunakan jarum di bagian ujung dan tengah, hal tersebut dimaksudkan agar saat proses torefaksi kandungan air atau zat lain yang terkandung dalam pelet akan menguap dan keluar melalui lubang. Torefaksi dilakukan dengan kombinasi suhu dan waktu yang telah ditentukan pada tabel data awal (Gambar 5).



Gambar 5. Skema torefaksi dengan *Electric Furnace* (EF).

3.5. Pengujian Sifat Fisis

3.5.1. Perubahan Warna

Pengujian warna dan sifat fisis pelet kaliandra dilakukan sebelum dan sesudah proses torefaksi. Pengukuran warna dilakukan dengan menggunakan sistem CIE-Lab dengan mengukur parameter kecerahan (L^*), kromatisasi merah/hijau (a^*), dan kromatisasi kuning/biru (b^*). Perubahan warna keseluruhan (ΔE^*). Perubahan warna ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔE^* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta L^* &= L_2^* - L_1^* \\ \Delta a^* &= a_2^* - a_1^* \\ \Delta b^* &= b_2^* - b_1^* \\ \Delta E^* &= (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}\end{aligned}$$

L_1^* , a_1^* , dan b_1^* secara berturut-turut adalah kecerahan, kromatisitas merah/hijau, dan kromatisitas kuning/biru sebelum perlakuan; Sementara itu L_2^* , a_2^* , dan b_2^* adalah kecerahan, kromatisitas merah/hijau, dan kromatisitas kuning/biru setelah perlakuan (Hidayat *et al.*, 2017a).

Sementara itu derajat perubahan warna ditentukan berdasarkan klasifikasi Valverde dan Moya (2014), yaitu:

$0,0 < \Delta E^* \leq 0,5$	= perubahan dapat diabaikan
$0,5 < \Delta E^* \leq 1,5$	= 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

3.5.2. Kerapatan

Kerapatan dinyatakan sebagai rasio massa terhadap volume, yang dapat dilakukan dengan mengukur dan menimbang volume dalam keadaan kering udara. Kerapatan pelet dapat dihitung menggunakan standar (SNI 8021-2014) dan persamaan sebagai berikut.

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

Keterangan:

KR = Kerapatan (g/cm^3)

M = Massa pelet (g)

V = Volume (cm^3)

3.6. Sifat Mekanis

Kekuatan tekan adalah karakteristik mekanik yang diuji. Mesin Uji *Universal Testometrik* M500-50AT digunakan untuk melakukan pengujian (UTM). Pelet diratakan dan dihaluskan di semua sisi sebelum diposisikan secara vertikal pada logam UTM. Mesin akan menekan pelet, dan jumlah waktu yang dibutuhkan pelet untuk pecah atau retak diukur. Setelah itu, mesin secara otomatis berhenti dan menunjukkan grafik dan nilai maksimum pada pengujian. Nilai kuat tekan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

σ = Kuat tekan (N/mm²)

P = Uji tekan maksimum (N)

A = Luas permukaan sampel (mm²)

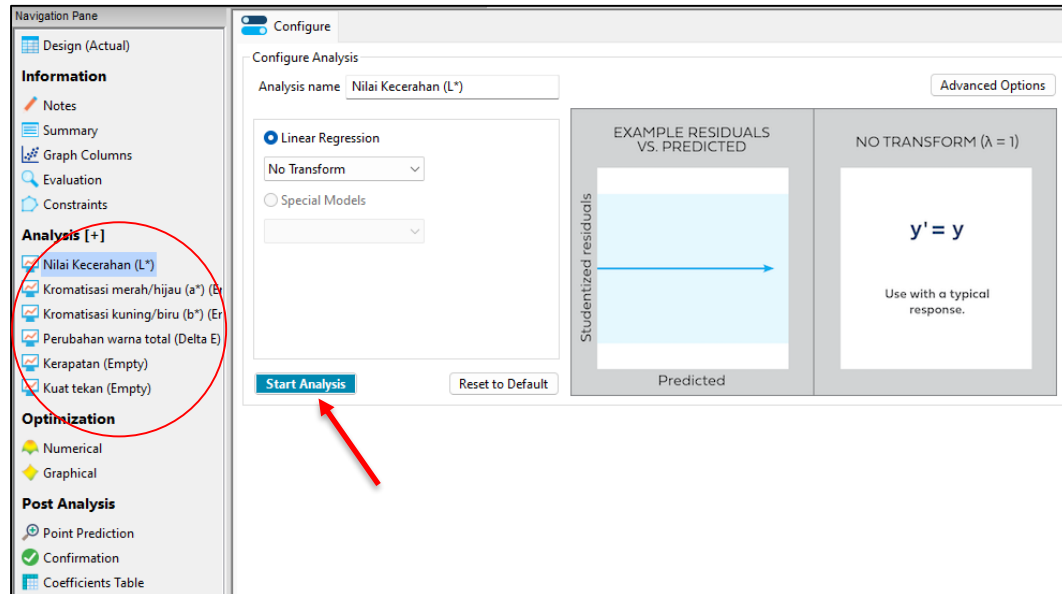
3.7. Optimasi dan Verifikasi Menggunakan Metode RSM

Setelah melakukan torefaksi berdasarkan kombinasi faktor suhu dan waktu yang telah ditentukan. Dilakukan penginputan hasil pengujian sampel pada desain percobaan yang sebelumnya telah dibuat, dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil pengujian dimasukkan ke dalam kolom *response* sesuai dengan *name* dan *units* yang telah ditentukan.

	Std	Run	Factor 1 A:Suhu Derajat C	Factor 2 B:Waktu Tinggal Menit	Response 1 Nilai Kecerahan ...	Response 2 Kromatisasi mer...	Response 3 Kromatisasi kuni...	Response 4 Perubahan warn...	Response 5 Kerapatan g/cm3	Response 6 Kuat tekan N/mm3
	6	1	200	20	53.52	6.06	15.54	1.09047	1.21247	10.8899
	21	2	200	20	47.96	4.74	15.64	2.50551	1.27053	9.28927
	13	3	200	30	47.58	5.64	14.76	2.82274	1.24739	15.7706
	22	4	200	30	47.44	5.7	14.18	3.27116	1.26954	12.3809
	9	5	200	40	46.38	5.8	13.48	4.44079	1.26402	12.8051
	8	6	200	50	46.2	5.28	12.7	5.10197	1.24614	15.7855
	3	7	220	20	46.1	5.74	12.34	5.42267	1.22797	13.726
	23	8	220	20	45.64	5.74	13.64	5.00616	1.2228	14.7631
	11	9	220	30	44.68	4.82	12.78	6.23451	1.22196	12.9702
	1	10	220	40	44.14	3.76	11.66	7.35073	1.25372	9.09674
	24	11	220	40	44.12	3.78	11.66	7.39097	1.22211	15.4237
	4	12	220	50	41.92	3.3	10.06	10.1994	1.14457	9.68758
	2	13	240	20	41.38	3.34	10.64	10.2801	1.1298	12.9818
	10	14	240	30	41.48	3.28	10.24	10.3895	1.18152	12.5282
	25	15	240	30	41.38	3.3	10.44	10.379	1.14851	10.5834
	12	16	240	40	40.26	2.36	8.7	12.5185	1.14249	8.88219
	5	17	240	50	39.28	1.92	7.92	13.7789	1.1118	8.97321
	7	18	260	20	38.66	2.54	7.9	14.0935	1.12552	9.87624
	14	19	260	30	37.88	2.42	6.96	15.2758	1.13379	10.0041
	15	20	260	40	36.22	1.66	4.42	18.2474	1.09854	7.336
	16	21	260	50	35.2	0.94	4	19.4126	1.24989	11.6727
	17	22	280	20	35.18	0.68	3.92	19.5409	1.26702	11.0765
	18	23	280	30	33.68	0.46	3.58	20.9388	1.21171	12.3464
	19	24	280	40	33.52	0.34	3.64	21.0592	1.25791	12.9044
	20	25	280	50	33.08	0.46	3.76	21.3161	1.19721	11.5565

Gambar 6. Hasil pengujian sampel.

Selanjutnya data dianalisis dengan mengklik *analysis*, dapat dilihat pada Gambar 7. Grafik Model, yang didasarkan pada model matematika tertentu, akan menampilkan aliran kontur respons. Pilih tampilan bilah alat dan centang Permukaan 3D jika ingin mengamati respons permukaan dalam tiga dimensi.



Gambar 7. Analisis data.

Respons kemudian akan dioptimalkan dengan mengeklik *optimization* di bilah alat di sebelah kanan. Kemudian pilih antara prediksi *numerical*, *graphical*, dan *point prediction* dari menu pengaturan di bawah *optimization*. Selanjutnya dengan mengidentifikasi pada pilihan minimalisasi, maksimalisasi, atau dalam jangkauan, peneliti dapat menentukan kriteria yang terdiri dari variabel dan jawaban yang akan dioptimalkan. Program akan menyajikan satu solusi yang disarankan dan banyak kemungkinan alternatif. Plot kontur kombinasi variabel terhadap respon yang ditunjukkan dapat dilihat pada grafik.

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah.

1. Torefaksi menyebabkan perubahan sifat fisis dan mekanis pelet kaliandra. Perubahan sifat fisis ditandai dengan berubahnya warna pelet kariandra menjadi lebih gelap, dan kerapatan pelet yang terus menurun seiring meningkatnya suhu dan waktu torefaksi. Perubahan sifat mekanis ditandai dengan nilai kuat tekan yang cenderung menurun seiring meningkatnya suhu dan waktu torefaksi.
2. Hasil optimasi torefaksi pelet kaliandra menggunakan metode RSM berada pada kombinasi suhu 240°C dengan waktu tinggal 30 menit. Kombinasi optimum ini didapatkan setelah melakukan verifikasi model dengan hasil verifikasi berada pada kisaran 95% *Confident Interval* (CI) dan 95% *Prediction Interval* (PI).

5.2. Saran

Mempertimbangkan beberapa hasil dari penelitian ini, saya menyarankan agar terdapat penelitian lebih lanjut terkait torefaksi menggunakan jenis tanaman, metode torefaksi, dan analisis yang berbeda dari penelitian sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulah, L. 2019. The growth and yield of *calliandra calothyrsus* trees as biomass-based energy feedstock. *Conference Series: Earth and Environmental Science* 308(1), 012078.
- Agustian, J., Hermida, L., Rustamaji, H. 2021. Penguasaan perangkat *design expert* dalam R&D produksi untuk keterampilan mengoptimasi operator proses PT. Tunas Baru Lampung (TBK) Bandar Lampung. *Abdimas Singkerru*. 1(2): 124-133.
- Akande, O.M., Olorunnisola, A.O. 2018. Potential of briquetting as a waste-management option for handling market-generated vegetable waste in Port Harcourt, Nigeria. *Recycling*. 3(2): 11.
- Akbar, R.I.N. 2017. *Karakteristik Pellet Kaliandra Merah (Calliandra calothyrsus) Sebagai Energi Bahan Bakar Ramah Lingkungan*. Skripsi. Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor. Bogor
- Akogun, O.A., Waheed, M.A. 2019. Property upgrades of some raw Nigerian biomass through torrefaction pre-treatment-A review. *Journal of Physics: Conference Series* 1378(3), 032026.
- Alamsyah, R., Siregar, N.C., Hasanah, F. 2017. Torrefaction study for energy upgrading on indonesian biomass as low emission solid fuel. *Conference Series: Earth and Environmental Science* 65(1), 012051.
- Alhassan, E.A., Olaoye, J.O. 2015. Briquetting characteristics of some agricultural residues using starch as a binder. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*. 8(6): 692-707.
- Anggraini, W. 2018. Keanekaragaman hayati dalam menunjang perekonomian masyarakat Kabupaten Oku Timur. *Jurnal Aktual*. 16(2): 99-106.
- Araújo, K. 2014. The emerging field of energy transitions: Progress, challenges, and opportunities. *Energy Research & Social Science*. 1: 112-121.
- Aydar, A.Y. 2018. *Utilization of Response Surface Methodology in Optimization of Extraction Of Plant Materials*. Janeza Trdine. Croatia. 180 hlm.

- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. 2016. *Outlook Energi Indonesia 2016: Pengembangan Energi Untuk Mendukung Industri Hijau*. Pusat Teknologi Sumber Daya Energi dan Industri Kimia Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. Jakarta. 83 hlm.
- Badan Standarisasi Nasional. 2018. *Pelet Biomassa Untuk Energi SNI 8675-2018*.
- Bashori, Z., Sumardi, S., Setiawan, I. 2013. Pengendalian *Temperature* Pada Plant Sederhana *Electric Furnace* Berbasis Sensor *Thermocouple* Dengan Metode Kontrol Pid. *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*. 2(1): 1-8.
- Basu, P. 2010. *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic Press Elsevier Oxford. United Kingdom. 376 hlm.
- Bazenet, R.A., Hidayat, W., Ridjayanti, S.M., Riniarti, M., Banuwa, I.S., Haryanto, A., Hasanudin, U. 2021. Pengaruh kadar perekat terhadap karakteristik briket arang limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 10(3): 283-295.
- Boyacı, İ.H. 2005. A new approach for determination of enzyme kinetic constants using response surface methodology. *Biochemical Engineering Journal*. 25(1): 55-62.
- Crawford N.C., Ray A.E., Yancey N.A., Nagle N. 2015. Evaluating the pelletization of pure and blended lignocellulosic biomass feedstocks. *Fuel Process Technol*. 140: 46-56
- Chew, J.J., Doshi, V. 2011. Recent advances in biomass pretreatment torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and sustainable energy reviews*. 15(8): 4212-4222.
- Dharmawan, A.H., Sudaryanti, D.A., Prameswari, A.A., Amalia, R., Dermawan, A. 2018. *Pengembangan bioenergi di Indonesia: Peluang dan tantangan kebijakan industri biodiesel*. CIFOR. Bogor. 23 hlm.
- Dutu, R. 2016. Challenges and policies in Indonesia's energi sector. *Energi Policy*. 98: 513-519.
- Farooq, Z., Rehman, S., 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: 939-945
- Febijanto, I. 2018. Perencanaan pltu biomassa berbahan bakar tanaman kaliandra merah di kalimantan timur. *Jurnal Energi dan Lingkungan*. 14(1): 1-54.

- GBEP. 2007. A review of the current state of bioenergy development in G8 p 5 countries. Global Bioenergy Partnership. <https://www.fao.org/publications> diakses pada 10 Oktober 2022.
- Giyanto, G. 2020. Kajian Preferensi Penggunaan Kompor Biomassa Pelet kayu Sebagai Alternatif pengganti Tungku Tradisional. *Prosiding Seminar Nasional NCJET* 1(1), 6-19.
- Harrison, M.E., Ottay, J.B., D'Arcy, L.J., Cheyne, S.M., Belcher, C., Cole, L., Dohong, A., Ermiasi, Y., Feldpausch, T., Gallego-Sala, A., Gunawan, A. 2020. Tropical forest and peatland conservation in Indonesia: Challenges and directions. *People and Nature*. 2(1): 4-28.
- Hartono, R., Wahyudi, I., Febrianto, F., Dwianto, W., Hidayat, W., Jang, J.H., Lee, S.H., Park, S.H., Kim, N.H. 2016. Quality improvement of oil palm trunk properties by close system compression method. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 44(2): 172-183.
- Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D.A., Kim, S., Lee, S., Yoo, J. 2021a. Valorization of Indonesian Wood Wastes through Pyrolysis: A Review. *Energies*. 14(5): 1-25.
- Haryanto, A., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., Hidayat, W. 2021b. Biomass Fuel from Oil Palm Empty Fruit Bunch Pellet: Potential and Challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 8(1): 33-42.
- Haryanto, A., Nita, R., Telaumbanua, M., Suharyatun, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D.A., Triyono, S., Amrul, Wisnu, F.K. 2021c. Torréfaction to Improve Biomass Pellet made of Oil Palm Empty Fruit Bunch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 749(1): 012047.
- Haryanto, A., Megasepta, R., Wisnu, F.K., Asmara, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Triyono, S. 2022. Use of corncob biochar and urea for pakchoi (*Brassica rapa* l.) cultivation: short-term impact of pyrolysis temperature and fertiliser dose on plant growth and yield. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*. 123(2): 189-195.
- Hendrati, R.L., Suwandi, Margiyanti. 2014. *Budidaya kaliandra (Calliandra calothyrsus) untuk bahan baku sumber energi*. IPB Press. Bogor. 44 hlm.
- Hendrati, R.L., Hidayati, N., Nurrohmah, S.H. 2020. Biomass and coppicing ability of genetically improved *Calliandra calothyrsus* for wood energy with different spacing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 522(1), 012001.

- Hidayat, W., Jang, J.H., Park, S.H., Qi, Y., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2015. Effect of temperature and clamping during heat treatment on physical and mechanical properties of okan (*Cylicodiscus gabunensis* [Taub.] Harms) wood. *BioResources*. 10(4): 6961-6974.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Kim, N.H. 2016. Effect of treatment duration and clamping on the properties of heat-treated okan wood. *BioResources*. 11(4): 10070-10086.
- Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J., Park, B., Banuwa, I.S., Febrianto, F., Kim, N. 2017. 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., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., Lee, S.H., Chae, H.M., Kondo, T., Kim, N.H. 2017. Carbonization characteristics of juvenile woods from some tropical trees planted in Indonesia. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*. 62(1): 145-152.
- Hidayat, W., Febrianto, F. 2018. *Teknologi Modifikasi Kayu Ramah Lingkungan: Modifikasi Panas dan Pengaruhnya Terhadap Sifat-Sifat Kayu*. Pusaka 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. in *E3S Web of Conferences* 03010.
- Hidayat, W., Rani, I.T., Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Hasanudin, U., Lee, S., Kim, S., Yoo, J., Haryanto, A. 2020a. Peningkatan kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit melalui torefaksi menggunakan reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Rekayasa Proses*. 14(2): 169-181.
- Hidayat, W., Ma'ruf, S.D., Abdillah, M., Prayoga, S., Zevan, R., Prihastono, G. B.A., Hardianto, A.H., Ridjayanti, S.M. 2020b. *Perlakuan Minyak Panas (Hot Oil Treatment) pada Kayu*. Pusaka Media, Bandar Lampung. 58 hlm.
- Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I. S., Yoo, J., Kim, S., Lee, S. 2021a. Characteristics of biochar produced from the harvesting wastes of meranti (*Shorea* sp.) and oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 12040.
- Hidayat, W., Rubiyanti, T., Sulistio, Y., Iryani, D.A., Haryanto, A., Amrul, Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U. 2021b. Effects of torrefaction using COMB dryer/pyrolizer on the properties of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and Jabon (*Anthocephalus cadamba*) pellets. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass (ICSB 2019)*, Bandar Lampung, Indonesia 209-213.

- Hidayat, W., Haryanto, A., Ibrahim, G.A., Hasanudin, U., Prayoga, S., Saputra, B., Rahman, A.F., Tambunan, K.G.A. 2022a. Pemanfaatan limbah biomassa jagung untuk produksi biochar di Desa Bangunsari, Pesawaran. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (JPKM) Tabikpun*. 3(1): 45-52.
- Hidayat, W., Pah, J.M., Suryanegara, L., Hasanudin, U., Haryanto, A., Wulandari, C. 2022b. Production and characterization of andong bamboo (*Gigantochloa pseudoarundinacea* (Steudel) Widjaja) pellets from various stem parts. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung* 11(4): 713-723.
- Ibitoye, S.E., Jen, T.C., Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T. 2021. Densification of agro-residues for sustainable energy generation: An overview. *Bioresources and Bioprocessing*. 8(1): 1-19.
- Iryani, D. A., Haryanto, A., Hidayat, W., Amrul, Talambanua, M., Hasanuddin, U., Lee, S.H. 2019. Torrefaction Upgrading of Palm Oil Empty Fruit Bunches Biomass Pellets for Gasification Feedstock by using COMB (Counter Flow Multi-Baffle) Reactor. *Proceeding of 7th Trend in Agricultural Engineering (TAE) 2019 Prague, Czech Rep.* 17-20.
- Karunanithy, C., Wang, Y., Muthukumarappan, K., Pugalandhi, S. 2012. Physiochemical characterization of briquettes made from different feedstocks. *Biotechnology research international* 2012(1), 165202.
- Kholiq, I. 2015. Analisis pemanfaatan sumber daya energi alternatif sebagai energi terbarukan untuk mendukung substitusi BBM. *Jurnal Iptek*. 19(2): 75-91.
- Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.W., Repke, J.U. 2016. Hay pellets the influence of particle size reduction on their physical–mechanical quality and energy demand during production. *Fuel processing technology*. 148: 163-174.
- Koç, B., Kaymak-Ertekin, F. 2010. Response surface methodology and food processing applications. *GIDA-Journal of Food*. 35(1): 63-70.
- Kusmana, C., Hikmat, A. 2015. The biodiversity of flora in indonesia. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*. 5(2): 187-198.
- Lestari, D.E. 2009. *Perancangan Bahan Bakar Pelet Biomasa Dengan Nilai Kalor Optimal Dan Emisi Rendah Untuk Masyarakat Perkotaan Di Indonesia*. Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok
- Lestari, R.Y., Prabawa, I.D.G.P., Cahyana, B.T. 2019. Pengaruh kadar air terhadap kualitas pelet kayu dari serbuk gergajian kayu jabon dan ketapang. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 37(1): 1-12.

- Mangurai, S.U.N.M., Maulana, S., Murda, R.A., Muhamad, S., Hidayat, W., Bindar, Y. 2022. Physical and mechanical properties of bamboo oriented strand board under various post-thermal treatment duration. *Jurnal Sylva Lestari*. 10(3): 310-320.
- Maulana, A.F., Utomo, S., Lestari, P., Arifriana, R., Dewi, N.A.C., Nugroho, A., Susanto, D. 2021. Potensi kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) dan gamal (*Gliricidia* sp.) di Daerah Istimewa Yogyakarta untuk pengembangan pelet kayu. *Agrifor: Jurnal Ilmu Pertanian dan Kehutanan*. 20(1): 71-80.
- Maia B.G.D., Souza O, Marangoni C, Hotza D, Oliveira A.P.N., Sellin N. 2014. Production and characterization of fuel briquettes from banana leave waste. *Chem Eng Trans*. 37: 439-444.
- McBride, A.C., Dale, V.H., Baskaran, L. M., Downing, M.E., Eaton, L.M., Efroymson, R.A., Storey, J.M. 2011. Indicators to support environmental sustainability of bioenergy systems. *Ecological indicators*. 11(5): 1277-1289.
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource technology*. 83(1): 47-54.
- Miao, Z., Grift, T.E., Hansen, A.C., Ting, K.C. 2013. Energy requirement for lignocellulosic feedstock densifications in relation to particle physical properties, preheating, and binding agents. *Energy & Fuels*. 27(1): 588-595.
- Montgomery, D.C. 2001. *Design and Analysis of Experimental*. John Wiley dan Sons Inc. New York. 724 hlm.
- Montgomery, D.C. 2005 *Design and Analysis of Experiments: Response Surface Method and Designs*. John Wiley and Sons, Inc. New Jersey. 780 hlm.
- Mopoung, S., Udeye, V. 2017. Characterization and evaluation of charcoal briquettes using banana peel and banana bunch waste for household heating. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 10(2): 353-365.
- Nabila, R., Hidayat, W., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D.A., Lee, S., Kim, S., Kim, S., Chun, D., Choi, H., Im, H., Lim, J., Kim, K., Jun, D., Moon, J., Yoo, J. 2023. Oil palm biomass in Indonesia: thermochemical upgrading and its utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 176, 113193.
- Oladeji, J.T. 2010. Fuel characterization of briquettes produced from corncob and rice husk residues. *The Pacific Journal of Science and Technology*. 11(1): 101-106.

- Pah, J.M., Suryanegara, L., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D.A., Wulandari, C., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hidayat, W. 2021. Product characteristics from the torrefaction of bamboo pellets in oxidative atmosphere. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Biomass (ICSB 2019)* Atlantis Press, Bandar Lampung, Indonesia 185-189.
- Parinduri, L., Parinduri, T. 2020. Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *ET Journal of Electrical Technology*. 5(2): 88-92.
- Passalacqua, F., Zaetta, C. 2004. Pellets in Southern Europe. The state of the art of pellets utilisation in Southern Europe. New perspectives of pellets from agri-residues. *Proceedings of the 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection* 10-14.
- Pimchuai, A., Dutta, A., Basu, P. 2010. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. *Energy Fuel*. 24:4638-4645.
- Promdee, K., Chanvidhwatanakit, J., Satitkune, S., Boonmee, C., Kawichai, T., Jarernprasert, S., Vitidsant, T. 2017. Characterization of carbon materials and differences from activated carbon particle (ACP) and coal briquettes product (CBP) derived from coconut shell via rotary kiln. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 1175-1186.
- Putri, R.E., Andasuryani, A. 2017. Studi mutu briket arang dengan bahan baku limbah biomassa. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*. 21(2): 143-151.
- Qi, Y., Yang, C., Hidayat, W., Jang, J.H., Kim, N.H. 2016. Solid bioenergy properties of *Paulownia tomentosa* grown in Korea. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 44(6): 890-896.
- Rafly, N.M., Riniarti, M., Hidayat, W., Praselia, H., Wijaya, B.A., Niswati, A., Hasanudin, U., 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.
- Rani, I.T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U. 2020. Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(1): 63-70.
- Refinery, N.P., Braimah, M. N. 2016. Utilization of response surface methodology (RSM) in the optimization of crude oil refinery. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*. 3: 4361-4369.
- Reid, W.V., Ali, M.K., Field, C.B. 2020. The future of bioenergy. *Global change biology*. 26(1): 274-286.

- Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y., Firmansyah, F. 2019. Pengaruh jenis biomassa pada pembakaran pirolisis terhadap karakteristik dan efisiensi bioarang asap cair yang dihasilkan. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*. 20(1): 18-27.
- Ridjayanti, S.M., Hidayat, W., Bazenet, R.A., Banuwa, I.S., and Riniarti, M. 2021. Pengaruh variasi kadar perekat tapioka terhadap karakteristik briket arang limbah kayu sengon (*Falcataria moluccana*). *Perennial*. 17(1): 5-11.
- Riniarti, M., Hidayat, W., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I.S., Yoo, J., Kim, S., Lee, S. 2021. Using two dosages of biochar from shorea to improve the growth of *Paraserianthes falcataria* seedlings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 12049.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I.G., Bakri, S. 2019. Karakterisasi pelet kayu karet (*Hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB). *Jurnal Sylva Lestari*. 7(3): 321-331.
- Rustamaji, H. 2012. Bahan bakar padat dari biomassa bambu dengan proses torefaksi dan densifikasi. *Jurnal Rekayasa Proses*. 3(2): 26-29.
- Sari, D.A., Hadiyanto, H. 2013. Proses produksi bioenergi berbasis bioteknologi. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*. 2(3): 1-6.
- Saputra, B., Tambunan, K.G.A., Suri, I.F., Febryano, I.G., Iswandaru, D., Hidayat, W. 2022. Effects of torrefaction temperature on the characteristics of betung (*Dendrocalamus asper*) bamboo pellets. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 11(2): 339-353.
- Sedjo, R.A. 2011. *Carbon neutrality and bioenergy: a Zero-Sum game?*. Resources for the Future Discussion Paper. Washington D.C. 35 hlm.
- Sedlmayer, I., Arshadi, M., Haslinger, W., Hofbauer, H., Larsson, I., Lönnermark, A., Bauer-Emhofer, W. 2018. Determination of off-gassing and self-heating potential of wood pellets–Method comparison and correlation analysis. *Fuel*. 234: 894-903.
- Sidabutar, V.T.P. 2017. Kajian peningkatan potensi ekspor pelet kayu indonesia sebagai sumber energi biomassa yang terbarukan. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 12(1): 99-116.
- Silalahi, C.A. 2020. *Biopelet Torefaksi Kayu Kaliandra (Calliandra calothyrsus)*. Skripsi. Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor. Bogor
- Simangunsong, B.C., Silalahi, G.S., Maulana, M.D., Manurung, E.G., Sitanggang, V.J., Tambunan, A.H. 2017. Analisis Levelized Cost of Energy Pelet Kayu. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 15(2): 133-140.

- Siregar, N., Nugraheni, Y.A., Hendarto, K.A. 2020. Keragaman genetik bibit kaliandra (*Calliandra calothyrsus* Meissn.) asal Jawa Barat. *Jurnal Perbenihan Tanaman Hutan*. 8(2): 121-132.
- Suastika, K.G., Karelius, K., Dirgantara, M., Rumbang, N. 2019. Proses torefaksi untuk meningkatkan nilai kalor cangkang sawit dengan metode comb. *Risalah Fisika*. 3(2): 47-50.
- Sukarta, I.N., Ayuni, P.S. 2016. Analisis proksimat dan nilai kalor pada pellet biosolid yang dikombinasikan dengan biomassa limbah bambu. *Jurnal Sains dan Teknologi*. 5(1): 728-735.
- Sulistio, Y., Febryano, I.G., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U., 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.
- Stelte, W. 2011. *Fuel Pellets From Biomass: Processing, Bonding, and Raw Materials*. Thesis. Technical University of Denmark. Denmark.
- Suprastiyo, H., Tjahjanti, P.H. 2016. Pembuatan *electric furnace* berbasis mikrokontroler. *Rekayasa Energi Manufaktur Jurnal*. 1(2): 1-5.
- Suryana, I.P.G.E., Antara, I.G.M.Y. 2021. Pengembangan teknologi informasi geografi sebagai media eksplorasi keanekaragaman hayati (Biodiversitas) di Indonesia. *Jurnal Sistem Informasi dan Komputer Terapan Indonesia*. 3(4): 46-55.
- Standar Nasional Indonesia. 2014. Pelet Kayu. No: 8021-2014 Indonesia.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H. 2007. Pembakaran briket biomassa cangkang kakao: pengaruh temperatur udara *preheat*. *Seminar Nasional Teknologi*. 10(1): 1-10.
- Syamsiro, M. 2016. Peningkatan kualitas bahan bakar padat biomassa dengan proses densifikasi dan torrefaksi. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*. 1(1): 7-13.
- Sylviani, S., Suryandari, E.Y. 2013. Potensi pengembangan industri pelet kayu sebagai bahan bakar terbarukan studi kasus di Kabupaten Wonosobo. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*. 10(4): 235-246.
- Tembe, E.T., Otache, P.O., Ekhuemelo, D.O. 2014. Density, shatter index, and combustion properties of briquettes produced from groundnut shells, rice husks and saw dust of (*Daniellia oliveri*). *Journal of applied biosciences*. 82: 7372-7378.

- Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, J.R., Wright, C.T., Boardman, R.D. 2011. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*. 7(5): 384-401.
- Trisnadewi, A.A.A.S., Cakra, I.G.L.O. 2015. Kecernaan in-vitro tanaman kaliandra (*Calliandra Calothyrsus*) berbunga merah dan putih. *Pastura*. 5(1): 39-41.
- Utomo, R., Suwignyo, B. 2015. Produktivitas tanaman kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) sebagai hijauan pakan pada umur pemotongan yang berbeda. *Buletin Peternakan*. 39(2): 103-108.
- Valverde, J.C., Moya, R. 2014. Correlation and modeling between color variation and quality of the surface between accelerated and natural tropical weathering in (*Acacia mangium*), (*Cedrela odorata*) and (*Tectona grandis*) wood with two coating. *Color Research and Application*. 39(5): 519-529.
- Wibowo, S., Laia, D.P., Khotib, M., Pari, G. 2017. Karakterisasi karbon pelet campuran rumput gajah (*Pennisetum Purpureum* Scumach) dan tempurung nyamplung (*Calophyllum Inophyllum* Linn.). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 35(1): 73-82.
- Wibowo, N.I., Arief, M.R.B. 2020. Pemanfaatan teknologi tepat guna kompor roket dengan formulasi bahan bakar pelet kayu dan kayu sengon. *Agroscience*. 10(2): 136-147.
- Wijaya, B.A., Hidayat, W., Riniarti, M., Prasetya, H., Niswati, A., Hasanudin, U., Banuwa, I.S., Kim, S., Lee, S., Yoo, J. 2022. Meranti (*Shorea* sp.) biochar application method on the growth of sengon (*Falcataria moluccana*) as a solution of phosphorus crisis. *Energies*. 15(6): 1-14.
- Yokoyama, S.Y., Matsumura. 2008. *Buku Panduan Biomassa Asia Panduan untuk Produksi dan Pemanfaatan Biomassa*. Proyek Bantuan untuk Pengembangan Kerjasama Asia untuk Pertanian Sadar Lingkungan. The Japan institute of Energi. Jepang. 365 hlm.
- Yulianto, T., Febryano, I.G., Iryani, D.A., Haryanto, A., Hasanudin, U., Hidayat, W. 2020. Perubahan sifat fisis pelet tandan kosong kelapa sawit hasil torefaksi. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(2): 104-111.
- Zubairu, A., Gana, S.A. 2014. Production and characterization of briquette charcoal by carbonization of agro-waste. *Energy Power*. 4(2): 41-47.
- Zych, D. 2008. *The viability of corn cobs as a bioenergy feedstock*. A report of the West Central Research and Outreach Center. University of Minnesota. 25 hlm.