

**PENGARUH KULIT DAN VARIASI PARTIKEL TERHADAP SIFAT
BIOENERGI PELET KALIANDRA (*Calliandra calothyrsus*)
(Skripsi)**

Oleh

**Wahyu Abdul Rahman
2014151070**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PENGARUH KULIT DAN VARIASI PARTIKEL TERHADAP SIFAT BIOENERGI PELET KALIANDRA (*Calliandra calothyrsus*)

Oleh

WAHYU ABDUL RAHMAN

Pelet biomassa kaliandra merupakan salah satu sumber energi alternatif yang dapat menggantikan penggunaan energi fosil. Pada umumnya pembuatan pelet biomassa kaliandra dilakukan dengan pembuatan secara langsung batang dan kulit kalindra tanpa pemisahan yang bertujuan untuk efisiensi dalam proses pembuatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan kualitas pelet biomassa kaliandra berusia 8 bulan dengan kulit dan tanpa kulit serta ukuran partikel. Ukuran partikel bahan yang digunakan adalah 20 mesh, 40 mesh, dan 60 mesh. Pembuatan pelet biomassa kaliandra menggunakan cetakan pelet biomassa berdiameter 12 mm, dan alat press hidrolik manual dengan tekanan tempa 3 ton. Karakterisasi pelet biomassa kaliandra dengan menguji kualitas pelet kaliandra seperti melakukan analisis proksimat, nilai kalor, sifat fisis, sifat mekanis, dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan standarisasi pelet biomassa yang berlaku pada beberapa negara yaitu Indonesia (SNI-8675:2018), Jepang (JA2021-0148), Korea (KFS' grade 4), Jerman (DIN-51731). Hasil penelitian menunjukkan kulit berpengaruh terhadap hasil proksimat. Pelet tanpa kulit memiliki nilai relatif lebih tinggi dari kadar abu, kadar air, dan karbon terikat. Nilai zat terbang pelet dengan kulit menunjukkan nilai yang lebih baik dibandingkan pelet tanpa kulit. Perbandingan nilai kalor antara pelet dengan kulit dan tanpa kulit tidak jauh berbeda. Nilai kalor paling tinggi dimiliki pelet dengan kulit 60 mesh (21,40 MJ/kg) dan pelet tanpa kulit 60 mesh (23,35 MJ/kg). Penelitian ini menunjukkan bahwa pelet kaliandra dengan kulit dan tanpa kulit memenuhi standarisasi Indonesia.

ABSTRACT

EFFECTS OF BARK AND PARTICLE VARIATIONS ON BIOENERGY FEATURES OF CALLIANDRA (*Calliandra calothyrsus*) PELLET

BY

WAHYU ABDUL RAHMAN

Calliandra biomass pellets are one of the alternative energy sources that can replace the use of fossil energy. In general, the making of calliandra biomass pellets is done by directly making calliandra stems and skins without separation which aims for efficiency in the manufacturing process. This study aims to determine the difference in the quality of 8-month-old calliandra biomass pellets with bark and without bark and particle size. The particle sizes of the materials used were 20 mesh, 40 mesh, and 60 mesh. The production of calliandra biomass pellets used a 12 mm diameter biomass pellet mold, and a manual hydraulic press with a forging pressure of 3 tons. Characterization of calliandra biomass pellets by testing the quality of calliandra pellets such as conducting proximate analysis, calorific value, physical properties, mechanical properties, and Fourier Transform Infrared (FTIR). The test results were then compared with the standardization of biomass pellets applicable in several countries, namely Indonesia (SNI-8675: 2018), Japan (JA2021-0148), Korea (KFS' grade 4), Germany (DIN-51731). The results showed that bark affects the proximate results. Pellets without bark have higher relative values of ash content, moisture content, and bound carbon. The fly substance value of pellets with bark showed a better value than pellets without bark. The comparison of calorific value between pellets with bark and without bark is not much different. The highest calorific value is owned by pellets with bark 60 mesh (21.40 MJ/kg) and pellets without bark 60 mesh (23.35 Mj/kg). This research shows that calliandra pellets with and without bark meet Indonesian standardization.

**PENGARUH KULIT DAN VARIASI PARTIKEL TERHADAP SIFAT
BIOENERGI PELET KALIANDRA (*Calliandra calothyrsus*)**

Oleh

Wahyu Abdul Rahman

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : **PENGARUH KULIT DAN VARIASI
PARTIKEL TERHADAP SIFAT BIOENERGI
PELET KALIANDRA (*Calliandra calothyrsus*)**

Nama : **Wahyu Abdul Rahman**

NPM : 2014151070

Jurusan : Kehutanan

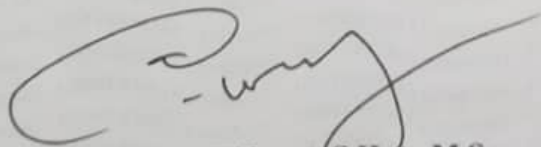
Fakultas : Pertanian

Tanggal Pengajuan : 23 April 2024

MENYETUJUI

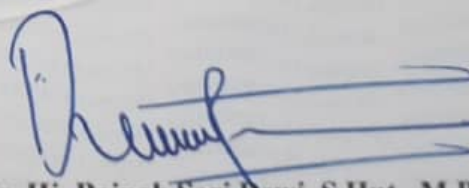
Komisi Pembimbing I

Ketua Jurusan Kehutanan



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

NIP 197911142009121001



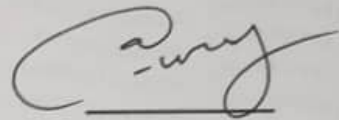
Dr. Hj. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P.IPM.

NIP 197310121999032001


MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

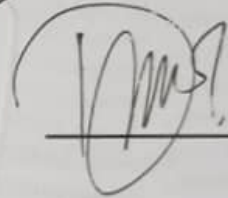
Ketua : **Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc.**



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



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



2. Dekan Fakultas Pertanian



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **20 Maret 2024**

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Wahyu Abdul Rahman
NPM : 2014151070
Jurusan : Kehutanan
Alamat Rumah : Jln. Kesehatan, Gg. Ampera, Tanjung Aman Kotabumi
Selatan Lampung Utara

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

“PENGARUH KULIT DAN VARIASI PARTIKEL TERHADAP SIFAT BIOENERGI PELET KALIANDRA (*Calliandra calothyrsus*)”

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

Bandar Lampung,

Yang membuat pernyataan



Wahyu Abdul Rahman
NPM 2014151070

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama Wahyu Abdul Rahman biasa di panggil wayuu atau dul, lahir di Kotabumi, Provinsi Lampung tanggal 11 Agustus 2002. Penulis merupakan anak keempat dari enam bersaudara, dari pasangan Bapak Djaswadi dan Ibu Ari Swarni. Jenjang pendidikan yang ditempuh oleh penulis yaitu TK Pembina yang beralamat di Kotabumi pada tahun 2007-2008, Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN 04 Tanjung Aman Kecamatan Kotabumi Selatan, Kabupaten Lampung Utara pada tahun 2008-2014, Sekolah Menengah Pertama (SMP) diselesaikan di SMPN 3 Kotabumi Lampung Utara pada tahun 2014-2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) diselesaikan di SMAN 2 Kotabumi Lampung Utara pada tahun 2018-2020. Penulis melanjutkan pendidikan dan terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur penerimaan Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama perkuliahan penulis aktif dalam organisasi Himasyilva (Himpunan Mahasiswa Kehutanan Universitas Lampung) sebagai Sekretaris bidang bidang 4 (bidang komunikasi informasi dan pengabdian masyarakat) pada tahun 2022 dan Sekretaris umum Himasyilva pada tahun 2023. Penulis aktif sebagai asisten dosen pada mata kuliah Pemanenan Hasil Hutan semester ganjil 2023/2024, Struktur dan Sifat sifat Kayu semester genap 2023/2024, Penggergajian dan Pemesinan Kayu semester genap 2023/2024. Penulis melaksanakan KKN di Desa Menggala, Kecamatan Kota Agung Timur, Kabupaten Tanggamus pada tahun 2023. Pada tahun yang sama di Bulan Juli-Agustus, penulis mengikuti kegiatan Praktik Umum (PU) selama 20 hari di Hutan Pendidikan Universitas Gadjah Mada (UGM) yaitu KHDTK Getas Kecamatan Kradenan, Blora, Jawa Tengah dan KHDTK Wanagama, Kabupaten Gunung Kidul, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Tahun 2024 Penulis juga mempublikasikan artikel di Global Forest Journal (GJF)

dengan judul “*Optimizing Caliandra (Caliandra calothyrsus) Biomass Pellets: Effects of Particle size and Bark Composition*”.

Bismillahirrahmanirrahim

Tidaklah pandai menulis dan merangkai kata, tapi akan saya usakahan untuk menyelesaikan semua ini dengan menikmati proses dan membayar perkataan yang insan ini keluarkan waktu itu.

**“I Dedicate This Undergraduate Thesis to My Beloved Family, My Special
Alm MAMA ARI SWARNI”**

SANWACANA

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan skripsi yang berjudul “ **PENGARUH KULIT DAN VARIASI PARTIKEL TERHADAP SIFAT BIOENERGI PELET KALIANDRA (*Calliandra calothyrsus*)**” dapat diselesaikan dengan baik sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Kehutanan di Universitas Lampung. Penulisan skripsi ini tidak lepas dari bimbingan dan bantuan serta petunjuk yang diberikan oleh berbagai pihak, sehingga penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allhamdulillah. Allah SWT yang telah memberikan kemudahan dan kelancaran serta kesehatan pada penulis sehingga dapat menyelesaikan tahapan penyusunan skripsi.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
4. Ibu Dr. Hj. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM. selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Wahyu Hidayat, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing yang telah membimbing dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini serta terimakasih telah memberikan nasihat, arahan dan semangat kepada penulis.
6. Bapak Dr. Indra Gumay Febryano, S.Hut., M.Si. selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan motivasi dan saran kepada penulis serta memberikan penulis banyak pembelajaran semasa perkuliahan .

7. Bapak Duryat, S.Hut., M.Sc. selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan motivasi dan saran kepada penulis.
8. Bapak Trio Santoso, S.Hut., M.Sc. selaku pembimbing akademik yang telah memberikan motivasi kepada penulis serta banyak pengalaman menjadi mahasiswa kehutanan unila.
9. Segenap dosen Jurusan Kehutanan yang telah memberikan ilmunya kepada penulis selama masa perkuliahan dan Staff administrasi Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
10. Kepada PT adaro yang telah memberikan Beasiswa kepada penulis yang memebantu penulis untuk menjalankan perkuliahan.
11. Kepada Beasiswa BRIN Barista yang telah membantu membiayai dan memebantu penelitian yang telah penulis laksanakan.
12. Kepada PT. Jaya Bumi Paser Kalimantan Timur yang memberikan sampel kaliandra yang dapat saya gunakan sebagai sampel penelitian penulis.
13. Papa Djaswadi yang merelakan waktu tenaga pikirannya untuk memberikan segalanya yang saya butuhkan selama perkuliahan dan motivasi serta pendirian yang selalu saya pegang teguh. Terimakasih telah menjadi papa yang paling mencintai penulis dan selalu ada untuk penulis.
14. Mama Ariswarni yang mendorong penulis untuk dapat melanjutkan akademik di jurusan kehutanan unila. Memberikan cinta dan nasihat untuk menjadi alasan suksenya penulis. Wanita hebat dengan segala kondisi selalu memberikan semangat dan ridha untuk penulis tetap bisa menjalankan perkuliahan. Mama bahagia disana wahyu abdul rahman telah membayar janji nya untuk dapat lulus sarjana kehutanan.
15. Mba rizha yang selalu memberikan dukungannya yang menggantikan sosok mama dalam keluarga. Amarahnya yang membakar semangat penulis untuk menyelesaikan studi di jurusan kehutanan unila.
16. Mba wiwid, mba wulan, ardi, rian, dan bude lastri yang selalu ada setiap penulis membutuhkan dukungan moral, dan terima kasih untuk semuanya.
17. Keluarga besar beavers (Kehutanan 2020) yang memberikan kehangatan keluarga dan motivasi mahasiswa yang berbagi suka dukanya menjadi mahasiswa.

18. Kehutanan suges sebagai tempat kembali pulang dan ditemukanya arti kehidupan tanpa orang tua. Mengandalkan satu sama lain melewati cobaan dan menjadi mahasiswa yang berhasil. Tetap kompak ya!! Jika kelulusan ini menjadi alasan kita berpisah, ingat akan saya carikan alasan untuk kita kumpul kembali. Makasi ya saudara tanpa ikatan darah.
19. Himasyilva himpunan yang memberikan penulis pengalaman menjadi rimbawan dan mahasiswa yang mampu menjalani kehidupan sebenarnya.
20. Seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu oleh penulis yang telah banyak membantu penulis selama melakukan perkuliahan dan penelitian penulis.

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

Bandar Lampung, 24 April 2024
Penulis

Wahyu Abdul Rahma

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang.....	1
1.2. Tujuan penelitian	3
1.3. Kerangka pemikiran	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Biomassa	6
2.2. Kaliandra	8
2.3. Densifikasi biomassa	10
2.4. Pelet biomassa.....	11
2.5. Standardisasi pelet biomassa.....	13
III. METODE PENELITIAN	15
3.1. Waktu dan lokasi penelitian.....	15
3.2. Alat dan bahan	15
3.3. Persiapan bahan dan perlakuan pendahuluan	16
3.3.1. Persiapan bahan baku	16
3.3.2. Pengeringan dan pengupasan kulit.....	17
3.3.3. Pemotongan dan penghancuran biomassa	17
3.3.4. Pemisahan partikel	18
3.3.5. Pencetakan pelet (<i>Pelletizing</i>).....	19
3.4. Evaluasi karakteristik pelet biomassa.....	19

3.4.1 Pengujian proksimat.....	20
3.4.2 Pengujian nilai kalor.....	21
3.4.3 Pengujian sifat fisik.....	22
3.4.4 Pengujian sifat mekanis.....	22
3.4.5 Analisis <i>Fourier Transform Infrared</i> (FTIR)	23
3.5. Analisis data.....	23
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	24
4.1. Pelet kaliandra dengan dan tanpa kulit.....	24
4.2. Analisis proksimat pelet kaliandra dengan kulit dan tanpa kulit.....	25
4.2.1 Kadar abu.....	26
4.2.2. Kadar zat terbang	28
4.2.3. Kadar air	29
4.2.4. Karbon terikat	31
4.3. Analisis nilai kalor pelet kaliandra dengan kulit dan tanpa kulit.....	32
4.4. Sifat fisis pelet kaliandra dengan kulit dan tanpa kulit	34
4.5. Sifat mekanis pelet kaliandra tanpa kulit dan dengan kulit	36
4.6. FTIR pelet kaliandra tanpa kulit dan dengan kulit	37
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	40
5.1. Kesimpulan	40
5.2. Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA.....	41
LAMPIRAN.....	59

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Standar kualitas pelet biomassa untuk sumber energi di beberapa negara.	14
2. Analisis proksimat pelet kaliandra.....	25
3. Analisis Kerapatan pelet kaliandra.	35
4. Gugus fungsi pada pelet kaliandra.....	38
5. Analisis Anova kuat tekan pelet kaliandra.	59
6. Analisis Anova kerapatan pelet kaliandra.	59
7. Nilai kuat tekan pelet kaliandra tanpa kulit.....	60
8. Nilai kuat tekan pelet kaliandra dengan kulit.	60
9. Kerapatan kering udara pelet kaliandra.....	60
10. Kerapatan kering oven pelet biomassa.....	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran.....	5
2. Batang kaliandra umur 8 bulan.....	16
3. Proses pengeringan oven dan pengupasan kulit	17
4. Penghancuran biomassa menggunakan mesin.....	18
5. Pengayakan partikel batang kaliandra.....	18
6. Pencetakan manual pelet kaliandra.....	19
7. Pengukuran volume dan menimbang massa pelet kaliandra.....	22
8. Pengujian kuat tekan menggunakan <i>universal testing machine</i> (UTM).....	23
9. Hasil pembuatan pelet kaliandra.....	24
10. Kadar abu pelet kaliandra.....	27
11. Diagram kadar zat terbang pelet kaliandra.....	28
12. Diagram kadar air pelet kaliandra.....	30
13. Diagram karbon terikat pelet kaliandra.....	31
14. Diagram nilai kalor pelet kaliandra.....	33
15. Nilai kerapatan kering udara pelet kaliandra.....	35
16. Nilai kerapatan kering oven pelet udara.....	36
17. Hasil analisis kuat tekan pelet kaliandra.....	37
18. Grafik hasil analisis FTIR Pelet kaliandra dengan kulit dan tanpa kulit.....	38
19. Persiapan bahan pembuatan pelet kaliandra.....	54
20. Pengeringan bahan pelet biomassa menggunakan oven.....	54
21. Pengupasan kulit kaliandra.....	55
22. Penghancuran kaliandra menjadi bentuk partikel serbuk.....	55
23. Pengayakan partikel kaliandra.....	55
24. Pencetakan pelet biomassa kaliandra.....	56

25. Hasil analisis proksimat dan nilai kalor.	56
26. Hasil analisis FTIR pelet tanpa kulit.	57
27. Hasil analisis FTIR pelet dengan kulit.	57
28. Pengujian kuat tekan pelet menggunakan UTM.	58
29. Pengujian kerapatan pelet.	58

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Persiapan dan pembuatan pelet biomassa kaliandra.	54
2. Hasil analisis lab nilai proksimat, nilai kalor, dan FTIR pelet biomassa kaliandra dengan dan tanpa kulit.....	56
3. Analisis kerapatan dan kuat tekan pelet biomassa kaliandra dengan dan tanpa kulit.....	58
4. Hasil analisis kuat tekan dan kerapatan pelet biomassa kaliandra dengan dan tanpa kulit.	59

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Manusia selalu memanfaatkan sumber energi untuk memenuhi kebutuhan hidupnya sehari-hari. Sumber energi yang sering dimanfaatkan yaitu energi fosil (Azhar dan Satria, 2018). Energi fosil banyak dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti pembangkit listrik, penggerak transportasi, dan juga untuk proses industri (Putra *et al.*, 2020). Penggunaan bahan bakar dari energi fosil secara terus menerus mengakibatkan ketersediaannya saat ini semakin berkurang (Parinduri dan Parinduri, 2020). Penggunaan energi fosil juga berdampak buruk bagi lingkungan, yaitu dapat menyebabkan perubahan iklim yang disebabkan oleh karbon dioksida yang dihasilkan dari proses pembakaran (Allifah *et al.*, 2022). Saat ini telah ditemukan sumber energi alternatif yang dapat mengurangi dampak buruk dari penggunaan energi fosil (Papilo *et al.*, 2015).

Salah satu sumber energi alternatif yang dapat menggantikan penggunaan energi fosil ialah dengan biomassa. Biomassa merupakan produk yang berasal dari bahan organik hasil fotosintesis dari berbagai sumber seperti kehutanan, pertanian, dan peternakan (Suganal dan Hudaya, 2019). Indonesia memiliki banyak sumber biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif dan telah diimplementasikan pada berbagai daerah (Hidayat *et al.*, 2017; Maulana *et al.*, 2021). Biomassa memiliki kelebihan bersifat karbon netral, karena karbon dioksida yang dihasilkan pada proses pembakaran akan diserap kembali oleh tanaman selama proses fotosintesis (Herlambang *et al.*, 2017). Perusahaan di

berbagai daerah di Indonesia seperti di wilayah Kalimantan, Sumatera, dan Sulawesi Utara telah berhasil menggunakan biomassa sebagai tambahan sumber energi untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan seperti mesin penggerak, pembangkit listrik, dan mesin pompa (Heriansyah, 2005). Banyak jenis biomassa yang biasa digunakan di Indonesia salah satunya kaliandra karena memiliki kualitas yang baik dan memiliki kemampuan untuk tumbuh dengan cepat (Prasetyo *et al.*, 2022). Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) merupakan jenis perdu dari famili Leguminosae (Agil, 2021). Tumbuhan kaliandra termasuk spesies cepat tumbuh (*fast growing*) (Mpapa dan Sudarmaji, 2018). Kaliandra merupakan jenis tanaman yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif terbarukan dan mudah digunakan (Hendrati dan Hidayati, 2014). Kaliandra biasa dimanfaatkan sebagai pakan ternak, kayu bakar, dan digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi di berbagai negara, seperti di Indonesia yang telah memiliki beberapa perusahaan yang memanfaatkannya (Maulana *et al.*, 2021).

Kelemahan dari kaliandra sendiri sebagai biomassa yang belum diolah memiliki densitas yang rendah, sehingga akan mengalami kesulitan dalam penanganannya (Syamsiro, 2016). Biomassa kaliandra memiliki kerapatan rendah, tidak seragamnya ukuran, kemampuan serap air yang tinggi (higroskopis), sulit penanganan, penyimpanan, dan transportasi (Rani *et al.*, 2020). Biomassa kaliandra akan mendapatkan kualitas yang baik jika dilakukan proses densifikasi. Densifikasi bertujuan untuk meningkatkan kerapatan biomassa sehingga dapat meningkatkan nilai kalor, memudahkan penyimpanan dan pengangkutan karena memiliki dimensi dan kualitas yang seragam (Rudini, 2021). Salah satu hasil dari proses densifikasi biomassa adalah pelet biomassa kaliandra.

Pelet biomassa kaliandra merupakan salah satu produk yang didapatkan dari proses pengolahan yang berasal dari bentuk serbuk menjadi bentuk solid melalui proses densifikasi (Wibowo dan Madya, 2020). Berbagai daerah di Indonesia telah menggunakan pelet ini sebagai energi alternatif batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan skema pencampuran pelet biomassa dengan bahan batu bara menggunakan teknologi *co-firing* atau pembakaran dua bahan

bakar berbeda dalam sistem pembakaran yang sama (Zahira dan Fadillah, 2022). Hasil dari *co-firing* dipengaruhi oleh kualitas dari pelet biomasanya itu sendiri. Kualitas suatu pelet biomassa dipengaruhi oleh bahan dan ukuran partikel yang digunakan dalam pembuatannya (Arsyad, 2014). Badan Standarisasi Nasional (2018) menjelaskan bahwa pelet kaliandra dengan kulit telah memenuhi standar yang menunjukkan kerapatan sebesar $1,32 \text{ g/cm}^3$. Rahayu *et al.* (2020) melaporkan kaliandra yang diproses dengan bahan kulit batangnya menjadi pelet menghasilkan kadar air yang rendah (5,13%). Hidayatullah *et al.* (2022) menjelaskan bahwa pelet kaliandra dengan ukuran partikel sebesar 60–80 mesh menghasilkan nilai kalor sebesar 4.617,20 kal/g dan telah memenuhi SNI 8675:2018 tentang pelet biomassa.

Sebagaimana penjelasan dari berbagai penelitian terdahulu tersebut dan dapat dilihat bahwa kaliandra memiliki potensi untuk dapat digunakan sebagai bahan baku pelet biomassa. Namun penelitian ilmiah mengenai pelet dari biomassa kaliandra dengan variasi ukuran partikel masih terbatas pembuatannya. Selain itu, belum ada penelitian yang menganalisis tentang pengaruh kulit terhadap kualitas pelet kaliandra. Oleh karena itu, penelitian ini diperlukan untuk membandingkan pelet kaliandra yang terbuat dari batang kaliandra dengan kulit dan tanpa kulit serta beberapa ukuran partikel.

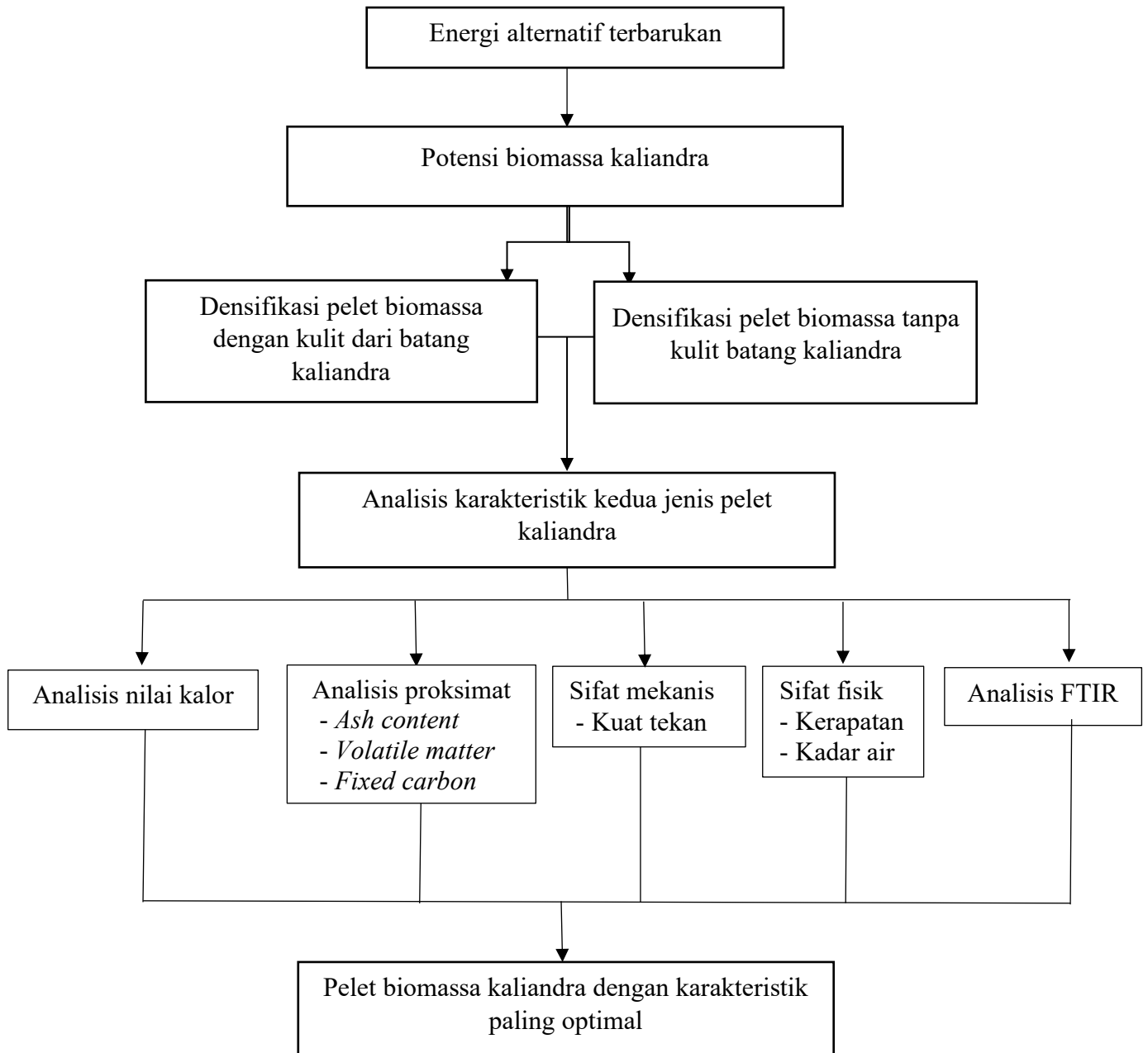
1.2. Tujuan penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis sifat fisik dan mekanis pelet kaliandra dengan pengaruh kulit dan tanpa kulit dengan perbandingan beberapa ukuran partikel.
2. Menganalisis parameter proksimat pelet kaliandra dengan pengaruh kulit dan tanpa kulit dengan perbandingan beberapa ukuran partikel.
3. Menganalisis nilai kalor pelet kaliandra dengan pengaruh kulit dan tanpa kulit dengan perbandingan beberapa ukuran partikel.

1.3. Kerangka pemikiran

Kebutuhan manusia akan sumber energi terus bertambah dan secara tidak langsung diperlukannya sumber energi yang lebih banyak. Sumber energi yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan yang mudah ditemukan adalah biomassa. Pelet biomassa merupakan salah satu produk biomassa dalam bentuk alternatif sebagai sumber energi yang dapat digunakan bersamaan dengan energi fosil untuk menghasilkan sumber energi. Pelet biomassa kaliandra merupakan salah satu produk yang memiliki potensi dengan kualitas dan bahan baku kaliandra yang cepat tumbuh. Kaliandra perlu melalui proses densifikasi untuk mendapatkan kualitas pelet yang baik sebelum digunakan. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mendapatkan pelet biomassa kaliandra yang memiliki kualitas karakteristik yang baik sesuai badan standarisasi Indonesia. Penelitian yang diperlukan dengan menganalisis pelet kaliandra yang dibuat dengan kulit dan tanpa kulit untuk mendapatkan yang mana yang lebih maksimal. Uji proksimat, nilai kalor, sifat fisik, sifat mekanis, dan FTIR merupakan bentuk analisis yang dilakukan untuk mengetahui kualitas dari kedua produk yang akan diuji tersebut. Berdasarkan uraian tersebut dapat dilihat kerangka penelitian yang telah disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka pemikiran

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Potensi biomassa kehutanan sebagai sumber energi

Indonesia masih memanfaatkan fosil sebagai sumber energi yang digunakan dalam kebutuhan sehari-hari (Parinduri dan Parinduri, 2020). Energi fosil merupakan sumber energi yang berasal dari sisa-sisa makhluk hidup. Namun pembentukan energi fosil memerlukan waktu berjutaan tahun sehingga dapat digunakan sebagai sumber energi (Suganal dan Hudaya, 2019). Energi fosil memiliki kekurangan yang perlu diperhatikan karena dampak dari hasil pembakarannya akan sangat berpengaruh terhadap lingkungan (Tsandra *et al.*, 2023). Sebagai contoh pembangkit listrik dalam penggunaan energi fosil akan menghasilkan karbon dioksida dalam proses pembakarannya yang semakin lama akan banyak dan berpotensi menimbulkan penyakit (Zahira dan Fadillah, 2022).

Kelemahan dari energi fosil dapat dikurangi dengan penggunaan biomassa dalam substitusi energi fosil sebagai sumber energi (Zahira dan Fadillah, 2022). Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang tumbuh sebagai tanaman atau bahan organik dan dihasilkan melalui proses fotosintesis (Febrianti *et al.*, 2020). Biomassa adalah bahan yang dikumpulkan dari berbagai tumbuhan untuk digunakan sebagai energi dalam jumlah besar. Sumber daya terdiri dari berbagai sumber daya pertanian, kehutanan, sisa limbah industri, limbah peternakan, dan ratusan hingga ribuan spesies tumbuhan daratan dan lautan (Korhaliller, 2010).

Biomassa yang telah dikonversi menjadi energi disebut dengan bioenergi. Penggunaan biomassa yang diperuntukkan untuk sumber energi memiliki

kelebihan dan keunikan dibandingkan dengan sumber energi dari fosil (Nabila *et al.*, 2023). Hal ini dikarenakan proses pembakaran yang akan menghasilkan karbon dioksida akan diserap kembali oleh tanaman dan pepohonan yang menjadi bahan dasar pembuatan biomassa (Yokoyama, 2008). Sumber daya biomassa bisa digunakan hingga berulang kali selama menjaga keseimbangan dari pemakaian dan pemeliharannya hingga sumber daya ini bersifat tidak terbatas berdasarkan siklus dasar karbon melalui proses fotosintesis (Ridhuan *et al.*, 2019). Pohon atau tanaman lainnya, melalui siklus penyerapan karbon dioksida dari udara, mengubahnya menjadi sumber makanan dan karbon organik (karbohidrat), kemudian menyimpannya dalam bagian-bagian tubuh seperti batang, daun, akar, umbi, buah, dan lain sebagainya (Mandari *et al.*, 2016).

Energi biomassa berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui, memiliki peluang besar untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif (Rani *et al.*, 2023). Biomassa dapat menjadi substitusi batu bara dalam pembangkit listrik yang dapat mengurangi emisi karbon dan efek rumah kaca (Darmawan *et al.*, 2023). Biomassa di beberapa industri kehutanan dan pertanian sering digunakan sebagai sumber energi untuk memenuhi kebutuhan panas dalam proses produksinya. Sedangkan secara tradisional, umumnya biomassa dimanfaatkan dengan langsung digunakan sebagai kayu bakar atau arang sebagai kebutuhan energi untuk memasak (Yokoyama, 2008).

Perubahan zaman memunculkan inovasi baru untuk pemanfaatan biomassa dengan melakukan beberapa perlakuan agar dapat dimanfaatkan sebagai bahan alternatif (Rosaira *et al.*, 2014; Hidayat *et al.*, 2024). Biomassa yang ditemukan di alam cenderung memiliki densitas yang rendah, ukuran yang tidak seragam, tingkat higroskopisitas yang tinggi, dan tantangan dalam hal penanganan, penyimpanan, serta transportasi (Sondakh *et al.*, 2022; Iryani *et al.*, 2023a). Penyimpanan, penanganan, dan transportasi dalam memindahkan biomassa akan lebih praktis jika biomassa tersebut sudah dilakukan modifikasi atau perlakuan. Biomassa yang dilakukan perlakuan disebut biomassa modern. Beberapa cara konversi yang dapat dilakukan yaitu pembuatan briket, peletisasi, gasifikasi, pirolisis, *liquification*, karbonisasi, dan densifikasi (Arhamsyah, 2010).

Pelet biomassa yang sudah digunakan sebagai energi alternatif energi fosil pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan skema pencampuran pelet biomassa dengan bahan batu bara menggunakan teknologi *co-firing* atau pembakaran dua bahan bakar dalam system pembakaran yang sama (Zahira dan Fadillah, 2022). Pelet biomassa yang digunakan merupakan hasil dari limbah pertanian, limbah kehutanan, dan hasil tumbuhan energi. Biomassa berupa hasil pertanian dan kehutanan di Indonesia sangat banyak sesuai dengan luasan lahan pertanian dan kehutanan di Indonesia (Pratiwi *et al.*, 2014). Biomassa yang termasuk tumbuhan energi dan potensial dikembangkan di Indonesia antara lain adalah akasia mangium (*Acacia mangium*), gamal (*Gliricidia sepium*), turi (*Sesbania grandiflora*), lamtorugung (*Leucaena luciocephalid*), Ekaliptus pelita (*Eucalyptus pellita*), akasia daun lebar (*Acacia Auriculiformis*), dan kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) (Mujiono dan Akbar, 2023).

2.2 Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*)

Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) adalah tanaman bercabang yang dapat tumbuh hingga 12 m dengan diameter mencapai 20 cm (Febijanto, 2018). Kaliandra termasuk dalam tanaman perdu dalam keluarga leguminosae (Agil, 2021). Asal tanaman kaliandra adalah daerah Meksiko hingga Amerika Tengah dan saat ini telah menyebar sampai Indonesia. Tanaman ini terbagi menjadi kaliandra merah dan kaliandra putih, yang dibedakan berdasarkan warna bunga. Tanaman kaliandra dapat hidup di ketinggian mulai dari 150–1.500 mdpl (Budiati, 2022). Taksonomi tanaman kaliandra sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Magnoliophyta
Class	: Magnoliopsida
Ordo	: Fabales
Famili	: Fabaceae/Leguminosae
Genus	: <i>Calliandra</i>

Spesies : *Calliandra calothyrsus* Meissn.

Kaliandra merupakan tanaman yang sering digunakan untuk reboisasi di daerah tropis. Tanaman ini memiliki pertumbuhan yang sangat cepat, mencapai tinggi sekitar 3,5 m dalam waktu sembilan bulan. Pertumbuhan yang cepat ini bahkan menyebabkan persaingan dengan ilalang, yang pada akhirnya menggantikan tanaman hama yang mendominasi sebagian besar wilayah Asia Tenggara tersebut. Kaliandra merah digunakan secara luas sebagai tanaman penutup tanah untuk melindungi pohon-pohon dari penebangan kayu ilegal (Eckhlolm *et al.*, 1984).

Kaliandra di tanam dengan pola 1 m x 1 m atau 2 m x 2 m sebagai sumber energi (Prasetyo *et al.*, 2018). Tanaman ini dapat dipanen pada usia 8 bulan (Abqoriyah *et al.*, 2015). Kaliandra akan terus menerus dilakukan pemanenan hingga umurnya 10 – 15 tahun sampai tanaman kaliandra sulit untuk tumbuh kembali (Mpapa dan Sudarmaji, 2018). Tanaman kaliandra akan di potong hingga menyisakan 30 – 50 cm di atas tanah lalu dibiarkan. Batang yang dibiarkan dimusim kemarau akan mengalami terubusan pada musim penghujan (Prasetyo *et al.*, 2018). Terubusan adalah tunas yang tumbuh pada tunggak tebangan. Kaliandra akan menghasilkan trubusan 2,5 – 3,5 m dalam 6 – 9 bulan dan produktivitasnya yang tinggi (65 m³/ha) (Darmawan, 2012). Kaliandra termasuk memiliki produktivitas yang tinggi di bandingkan kayu sengon 48 m³/ha dalam setahun (Hardiatmi, 2010).

Kaliandra adalah tanaman yang memiliki tingkat kelangsungan hidup yang tinggi, terutama pada jenis tanah seperti laterit, *limestone*, dan tanah lempung (Maulidani *et al.*, 2019). Tanaman ini memiliki kemampuan untuk tumbuh bahkan di tanah dengan tingkat keasaman rendah, dengan pH sekitar 4,5. Namun, perlu diperhatikan bahwa kaliandra cenderung tidak dapat hidup dengan baik di tanah yang memiliki drainase yang buruk atau mengalami genangan air (Murtadha, 2022).

Kaliandra adalah salah satu tanaman yang sering dipilih untuk mengembalikan lahan yang telah terdegradasi menjadi lahan yang produktif. Ini terutama bermanfaat di lahan pasca tambang yang sering memiliki masalah kondisi tanah. Tanah pasca tambang sering kali memiliki kualitas tanah yang rendah, berasal dari

timbunan lapisan bawah tanah (Edi *et al.*, 2024). Kaliandra merupakan pilihan tepat untuk revegetasi lahan pasca tambang karena termasuk dalam kelompok tanaman legum yang memiliki bintil akar yang berguna untuk memperbaiki kualitas tanah (Dharmaputri *et al.*, 2016). Selain itu, kaliandra juga dapat digunakan kembali sebagai biomassa yang mudah dimanfaatkan (Lensari *et al.*, 2022). Kaliandra memiliki kegunaan yang penting karena dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi di beberapa perusahaan (Zahira dan Fadillah, 2022). Kaliandra dapat didensifikasi menjadi pelet kaliandra yang memiliki kualitas yang relatif bagus seperti memiliki nilai kalor yang tinggi (16,46 – 19,76 MJ/kg) (Maulana *et al.*, 2021; Febijanto, 2018).

2.3 Densifikasi biomassa

Biomassa umumnya memiliki densitas dan nilai kalor yang rendah, sehingga perlu dilakukan suatu proses untuk meningkatkan nilai tersebut. Densifikasi merupakan langkah untuk meningkatkan nilai densitas biomassa (Gufon *et al.*, 2023).

Densifikasi adalah proses pemadatan biomassa dengan cara memberikan penekanan kepada partikel sampai menyatukan setiap partikel untuk mendapatkan kepadatan dan kerapatan (Frodeson *et al.*, 2019). Biomassa padat hasil densifikasi dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif dalam menggantikan sebagian batu bara pada pembangkit listrik, mengurangi emisi karbon dan efek gas rumah kaca (Panwar *et al.*, 2011).

Proses densifikasi bertujuan untuk meningkatkan kepadatannya, memudahkan penyimpanan dan pemindahan, meningkatkan nilai kalor per satuan volume, serta menyeragamkan ukuran dan kualitas (Frida *et al.*, 2019; Soolany, 2020). Proses densifikasi dilakukan pada tekanan atau suhu yang cukup tinggi, dengan bentuk dan ukuran disesuaikan dengan kebutuhan. Partikel biomassa saling mengikat membentuk pelet selama proses pengolahan, transportasi, dan pembakaran karena tekanan densifikasi. Proses-proses ini termasuk pembiketan (*briquetting*),

peletisasi (pelletizing), pengkubusan (cubing), dan pemadatan atau pengemasan biomassa di lahan pertanian (Ridjayanti *et al.*, 2021).

Bentuk hasil dari proses densifikasi biomassa yang paling umum adalah menjadi briket dan pelet (Ibitoye *et al.*, 2021). Pengelolaan biomassa melibatkan dua pendekatan, yaitu biomassa yang dapat digunakan secara langsung dan dapat digunakan setelah diolah menjadi produk. Biomassa dapat diubah menjadi briket atau pelet melalui proses densifikasi (Yudha *et al.*, 2017). Biomassa yang telah dikonversi menjadi pelet melalui proses peletisasi memiliki kelebihan dibandingkan biomassa yang digunakan secara langsung tanpa adanya perlakuan terlebih dahulu (Mauritio *et al.*, 2022).

Proses densifikasi biomassa merupakan perlakuan seperti pemadatan sumber daya biomassa yang diubah menjadi sumber energi seperti pelet biomassa (Ibitoye *et al.*, 2021). Sifat fisika-mekanik pelet yang baik sangat bergantung pada dua komponen penting: kondisi bahan baku dan kondisi proses. Sifat pelet dipengaruhi secara signifikan oleh beberapa parameter bahan baku, termasuk distribusi ukuran partikel, kadar air, dan bahan campuran yang homogen (Hendra, 2012). Bahan baku dengan distribusi partikel yang rapat kemungkinan menghasilkan pelet dengan densitas tinggi, dan bahan baku yang menghasilkan pelet pada kadar air yang ideal biasanya menghasilkan pelet dengan karakteristik yang baik (Rubiyanti *et al.*, 2019). Namun, tekanan kompresi dan suhu merupakan parameter proses yang paling penting (Kirsten *et al.*, 2016).

2.4 Pelet biomassa

Pelet adalah hasil pengolahan biomassa yang diperkecil ukurannya dan dikompresi menjadi bentuk silindris yang dapat digunakan sebagai sumber energi (Rani *et al.*, 2020). Pelet biomassa merupakan alternatif bahan bakar yang secara umum terbuat dari limbah atau hasil hutan salah satunya adalah pelet kayu (Setyana *et al.*, 2021). Pelet kayu diproduksi dalam beberapa proses manufaktur.

Kadar kelembaban awal kayu umumnya sekitar 50%. Diperlukan pengeringan bahan baku hingga kadar kelembaban 10 – 20% untuk mendapatkan kondisi penggilingan dan peletisasi yang optimal (Yokoyama, 2008). Ukuran partikel yang besar harus dikeringkan dengan *rotary kiln*, sedangkan ukuran partikel yang lebih kecil dikeringkan dengan *flash dryer*. Kemudian, bahan baku digiling sesuai dengan ukuran pelet. Pada kasus kayu utuh atau limbah berukuran besar, bahan baku harus dihancurkan sebelum proses pengeringan untuk mempersiapkan kadar kelembaban secara merata (Widjaya *et al.*, 2018). Proses peletisasi menggunakan mesin pelet yang terdiri dari pengumpan, rol, dan cetakan. Proses pendinginan diperlukan karena pelet yang baru diproduksi memiliki suhu tinggi dan mengandung banyak kelembaban. Terakhir, pelet berkualitas rendah dihilangkan dalam proses penyaringan. Pelet tersebut digunakan sebagai sumber energi untuk pengeringan (Yokoyama, 2008).

Pelet kayu adalah salah satu pemanfaatan biomassa modern sebagai sumber energi yang dapat menghasilkan energi sebesar 20,52 MJ/kg karena mempunyai kadar air rendah (8–10%), kadar abu (0,5–1%), dan kerapatan 650 kg/m³. Satu kilogram pelet kayu menghasilkan panas setara dengan yang dihasilkan oleh setengah liter minyak (Setyawan *et al.*, 2021). Pelet kayu hampir sama kegunaannya dengan kayu bakar pada umumnya. Namun, pelet kayu memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan kayu bakar, seperti mudah dinyalakan dan dibakar. Jenis dan bentuk pelet kayu memiliki keunggulan seperti dapat diangkut dengan efisien dan mengeluarkan sedikit asap selama pembakaran. serta memiliki kepadatan energi yang tinggi (Yokoyama, 2008).

Pelet biomassa telah menjadi sumber energi berkelanjutan dan ramah lingkungan karena karakteristiknya yang menarik, seperti dapat diperbaharui, tidak ada emisi karbon dioksida, dan biaya produksi rendah (Aji *et al.*, 2022). Pelet menjadi primadona dan andalan sumber energi terbarukan di negara maju. Dalam konteks ini, penggunaan pelet kayu telah menjadi alternatif untuk menggantikan peran energi fosil terutama batu bara dalam aplikasi pemanas udara di rumah dan bangunan serta digunakan sebagai bahan bakar untuk tungku *boiler* pembangkit listrik (Nur dan Yandri, 2022). Untuk mengurangi ketergantungan pada energi

fosil sejumlah negara terutama Eropa, Jepang, Korea Selatan, dan China, telah menetapkan beberapa kebijakan untuk menggunakan sumber energi biomassa seperti pelet kayu (Maulana *et al.*, 2021).

2.5 Standardisasi pelet biomassa

Pelet biomassa memiliki kelebihan tersendiri dibandingkan beberapa produk yang serupa dalam hal sumber energi. Salah satu keunggulan utamanya adalah harganya lebih terjangkau dan stabil dibandingkan energi fosil. Pelet biomassa mengandung energi yang berkisar 14,24 – 18,76 MJ/kg (Giyanto, 2020). Teknologinya dapat dikatakan lebih efisien daripada bahan bakar biomassa lain. Pelet biomassa juga efektif digunakan sebagai bahan bakar rumah tangga maupun sektor industri (Wahyullah *et al.*, 2018).

Negara-negara penghasil pelet kayu utama di Amerika Utara dan Eropa tidak dapat memenuhi permintaan pasar sepenuhnya, sehingga negara-negara lain di Asia dapat meningkatkan ekspor mereka (Maulana *et al.*, 2021). Pelet kayu sebagai komoditas perdagangan global membuka peluang bisnis bagi pengusaha Indonesia untuk memanfaatkan potensi biomassa berbasis limbah industri pertanian, perkebunan, dan kehutanan menjadi komoditas bernilai ekonomi, baik untuk memenuhi kebutuhan energi nasional ataupun ekspor (Nur dan Yandri, 2022). Dengan potensi biomassa terbesar di dunia dari segi bahan baku dan luas lahan tanaman, Indonesia mungkin menjadi pengeksport pelet kayu terbesar di dunia. Ini dibandingkan dengan negara-negara produsen pelet kayu lainnya, seperti Thailand, Vietnam, Malaysia, dan China (Maulana *et al.*, 2021). Indonesia dengan perkembangan teknologi dapat mengantarkan kita sebagai negara eksport pelet biomassa di masa depan (Sidabutar, 2018). Dalam tujuannya melindungi produsen, konsumen, tenaga kerja, maupun masyarakat pada aspek keamanan, keselamatan, kesehatan, serta pelestarian fungsi lingkungan, Indonesia memiliki standar baku yang berlaku secara nasional. Standardisasi ini adalah Standar

Nasional Indonesia (SNI 8675:2018). Untuk karakteristik pelet biomassa tercantum di standarisasi setiap negara antara lain dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar kualitas pelet biomassa untuk sumber energi di beberapa negara.

No.	Parameter	Satuan	Persyaratan			
			Indonesia (SNI 8675:2018)	Korea (KFS')	Jepang (JA2021- 0148)	Jerman (DIN 51731)
1	Kadar abu	%	≤ 5	≤ 6	≤ 2	≤ 1,5
2	Kadar air	%	≤ 12	≤ 15	≤ 10	≤ 12
3	Kadar zat terbang	%	≤ 80	-	-	-
4	Karbon terikat	%	≥ 14	-	-	-
5	Nilai kalor	MJ/kg	≥ 16,5	≥ 16,9	≥ 16,5	≥ 17,5

Ket : Grade yang digunakan SNI (Industri), KFS' (Grade 4), JA (Grade B).

Terdapat beragam jenis tumbuhan di Indonesia yang dapat dijadikan sebagai pelet biomassa, dengan potensi bahan baku yang berasal dari berbagai sektor seperti pertanian, kehutanan, dan peternakan. Beberapa jenis tanaman potensial untuk diolah menjadi bahan baku pelet kayu meliputi kaliandra, gamal, lamtoro, dan akasia, namun di antara semuanya, gamal dan kaliandra dianggap paling potensial (Maulana *et al.*, 2021). Kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) menjadi tanaman yang sangat potensial karena pertumbuhannya yang kuat, penampilan yang baik, serta statusnya sebagai tanaman pionir. Tekstur kaliandra cukup padat, mudah dikeringkan, dan mudah terbakar, dengan berat jenis berkisar antara 0,5 hingga 0,8 g/cm³. Selain itu, kaliandra juga mampu menghasilkan energi sebesar 17,58 MJ/kg, menjadikannya sebagai pilihan ideal untuk produksi kayu bakar atau arang (Mauritio *et al.*, 2023).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan pada November 2023 – Maret 2024. Proses penyiapan dan pembuatan pelet dilakukan di Workshop Teknologi Hasil Hutan Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Proses pencetakan pelet dilakukan di Laboratorium Teknologi Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Sementara itu untuk proses pengujian sifat fisik dan mekanik dilakukan di Laboratorium Teknologi Hasil Hutan Jurusan Kehutanan Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Pengujian proksimat dan nilai kalor dilakukan di Laboratorium Analisis dan Instrumentasi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Lampung. Pengujian FTIR dilakukan di Laboratorium Terpadu dan Sentral Inovasi Teknologi Fakultas MIPA Universitas Lampung.

3.2 Alat dan bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain timbangan elektrik (skala 0,0001g), pemotong kayu, oven, *hammer mill*, alat cetak, *cutter*. Alat yang digunakan untuk menganalisis karakteristik pelet kaliandra yaitu *furnace* (Thermo Scientific FB1410M – 33, ASHEVILLE, United States), oven (UN30, *Memmert, German*), kaliper, *calorimetric bomb* (Oxygen Combustion Bombs, 1108 Oxygen Combustion Vessel, Parr Instrument Company, Moline, United States), dan spektroskopi *fourier transform infrared* (Scimitar 2000, Varian, Palo Alto, Amerika Serikat). Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah batang

kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) dengan kulit dan tanpa kulit yang berumur 8 bulan yang didapatkan dari PT. Jaya Bumi Paser yang dikirim langsung dari Kabupaten Paser.

3.3 Persiapan bahan dan pembuatan pelet

3.3.1. Persiapan bahan baku

Metode dan tahapan persiapan serta pembuatan pelet mengacu pada penelitian terdahulu (Simanjuntak *et al.*, 2022; Haryanto *et al.*, 2023; Permatasari *et al.*, 2023). Batang kaliandra terlebih dahulu dipotong menjadi ukuran lebih kecil yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Batang kaliandra umur 8 bulan

3.3.2. Pengeringan dan pengupasan kulit

Kaliandra yang sudah dikonversi menjadi ukuran kecil akan dikeringkan dengan oven (BJPX - Summer, PT. Innotech System, Jakarta, Indonesia). Pengeringan dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi kadar air yang terdapat pada biomassa yang pada umumnya nilai kadar air yang dapat digunakan sebagai syarat pada proses peletisasi yaitu berkisar 6–18% (Amirta, 2018). Pengeringan dilakukan dengan memasukkan batang kaliandra ke dalam oven dengan suhu 80°C dengan waktu 3 hari untuk mendapatkan kekeringan yang setimbang. Kemudian batang kaliandra yang telah dioven dilakukan pengupasan. Pengupasan dilakukan untuk mendapatkan batang kaliandra tanpa kulit sebagai sampel penelitian. Adapun proses yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses pengeringan oven dan pengupasan kulit

3.3.3. Pemotongan dan penghancuran biomassa

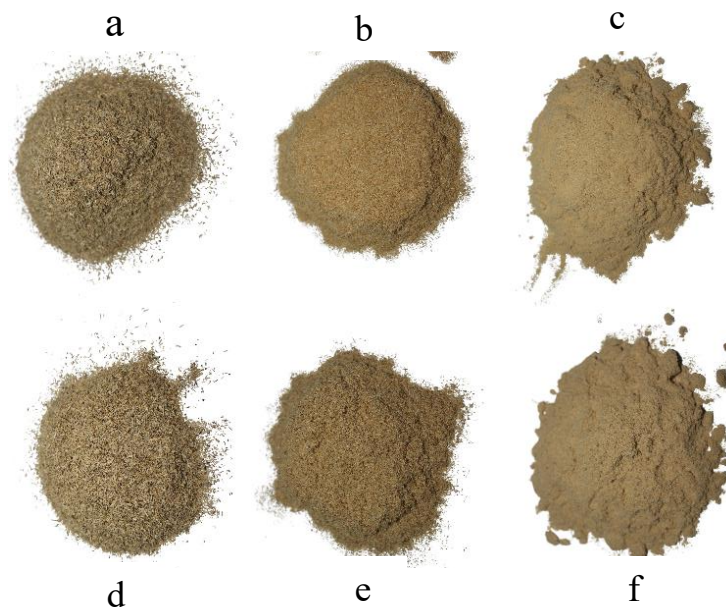
Tahapan pemotongan batang kaliandra dengan proses mencacah batang secara manual menggunakan pisau besar untuk mendapatkan ukuran biomassa yang lebih kecil. Proses selanjutnya adalah penghancuran dengan proses penggilingan biomassa menggunakan penggiling kopi yang bertujuan untuk menghaluskan hasil pemotongan menjadi partikel yang lebih kecil hingga berbentuk serbuk (Gambar 4).



Gambar 4. Penghancuran biomassa menggunakan mesin

3.3.4. Pemisahan partikel

Setelah partikel berbentuk serbuk dilakukan pemisahan partikel menggunakan ayakan dengan ukuran 20, 40, dan 60 mesh (Gambar 5). Pemisahan partikel bertujuan untuk mendapatkan biomassa dengan ukuran partikel yang berbeda sebagai sampel untuk membuat pelet biomassa.



Gambar 5. Pengayakan partikel batang kaliandra (a) tanpa kulit 20 mesh, (b) tanpa kulit 40 mesh, (c) tanpa kulit 60 mesh, (d) dengan kulit 20 mesh, (e) dengan kulit 40 mesh, (f) dengan kulit 60 mesh.

3.3.5. Pencetakan pelet (*Pelletizing*)

Batang kaliandra yang telah menjadi serbuk kemudian di proses menjadi pelet. Proses pencetakan dilakukan menggunakan alat kempa hidrolis dengan ukuran diameter cetakan 12 mm untuk setiap pelet memerlukan 3 g partikel kaliandra (Gambar 6). Pada tahap pemadatan partikel kaliandra dimasukkan ke mesin kempa lalu ditekan menggunakan press hidrolis. Pada proses pencetakan menggunakan kekuatan tekan 30.000 N.



Gambar 6. Pencetakan manual pelet kaliandra

3.4 Evaluasi karakteristik pelet biomassa

Karakteristik pelet yang diuji dalam penelitian ini meliputi pengujian proksimat, nilai kalor, sifat fisik, sifat mekanik, dan analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Analisis sifat fisik dalam penelitian ini yaitu kerapatan dan pada sifat mekaniknya yaitu kuat tekan. Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat dan kualitas pelet biomassa kaliandra. Pengujian pelet biomassa kaliandra mengacu pada penelitian terdahulu (Rani *et al.*, 2020; Tambunan *et al.*, 2023; Hidayat *et al.*, 2020; Yulianto *et al.*, 2020; Rubiyanti *et al.*, 2019; Hidayat *et al.*, 2022;

Maurito *et al.*, 2023; Saputra *et al.*, 2020; Haryanto *et al.*, 2021; Iryani *et al.*, 2023b)

3.4.1 Pengujian proksimat

Pengujian proksimat dilakukan untuk mengetahui kualitas pelet biomassa dari efisiensi pembakarannya. Pengujian ini meliputi kadar abu (*ash content*), bahan yang mudah menguap (*volatile matter*), kadar air (*moisture content*), dan karbon terikat (*fixed carbon*).

a. Kadar abu (*ash content*)

Kadar abu merupakan presentase kandungan mineral yang tidak menguap menjadi residu saat pembakaran. Nilai dari kadar abu didapatkan dari hasil uji menggunakan alat *furnace* (Thermo Scientific FB1410M – 33, ASHEVILLE, United States). Analisis ini menggunakan prosedur pada standar ASTM: E1755-01 dimana sampel biomassa diletakan dalam alat *furnace* dengan suhu 600°C selama 6 jam untuk mendapatkan kadar abu yang dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{\text{berat abu (g)}}{\text{berat kering oven (g)}} \times 100 \%$$

b. Kadar zat terbang (*volatile matter*)

Kadar zat terbang merupakan kehilangan masa setelah pemanasan tanpa udara. Kadar zat terbang didapatkan dengan hasil uji menggunakan alat *furnace* (Thermo Scientific FB1410M – 33, ASHEVILLE, United States). Analisis ini menggunakan prosedur pada standar ASTM: E872-82 dengan meletakan sampel ke dalam *furnace* selama 16 jam pada suhu 103°C setelah itu dinginkan dan melakukan pengulangan dengan *furnace* selama 2 jam pada suhu 103°C setelah itu dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Kadar zat menguap (\%)} = \frac{\text{Kehilangan Berat Sampel (g)}}{\text{berat kering oven (g)}} \times 100 \%$$

c. Kadar air (*moisture content*)

Kadar air dilakukan untuk mengetahui perbandingan dari berat pelet setelah dilakukan perlakuan panas dengan berat sampel sebelumnya. Pengujian dilakukan dengan oven (UN30, *Memmert, German*) pada suhu 105°C hingga berat konstan. Menggunakan prosedur ASTM: E1756-01, kadar air dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{(\text{berat awal (g)} - \text{berat kering oven (g)})}{\text{berat kering oven (g)}} \times 100\%$$

d. Karbon terikat (*fixed carbon*)

Karbon terikat adalah sesuatu yang terdapat pada sampel yang bukan dari kadar air, kadar abu, dan kadar zat terbang. Analisis ini mengacu pada standar SNI 8675:2018, yang dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Karbon terikat (\%)} = 100\% - (\text{kadar abu} + \text{kadar air} + \text{kadar zat menguap}) \times 100\%$$

3.4.2 Pengujian nilai kalor

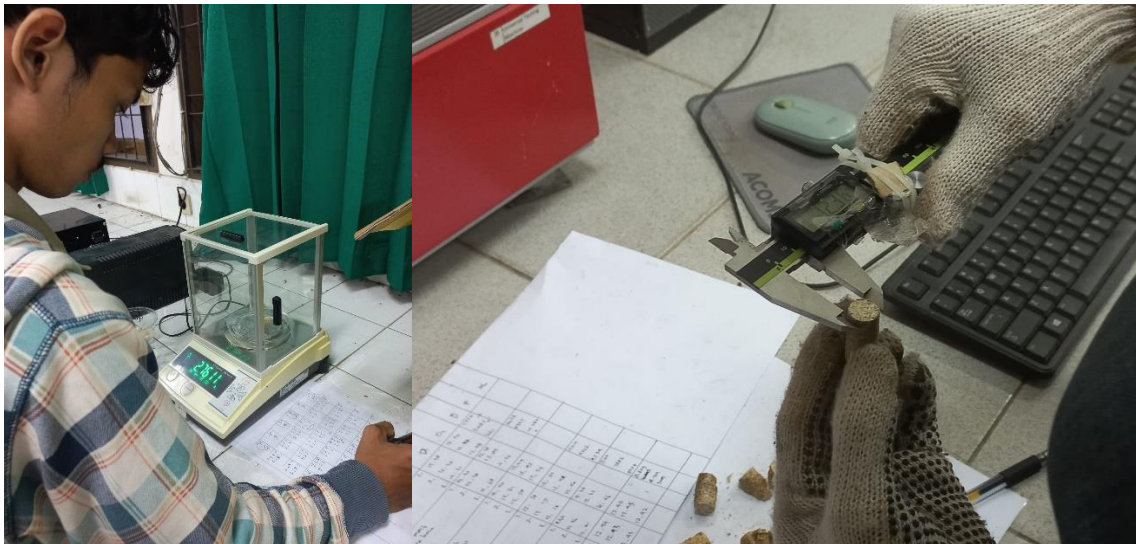
Nilai kalor bahan bakar merupakan banyaknya energi panas dihasilkan secara penuh yang dibebaskan oleh bahan bakar melewati proses pembakaran sempurna persatuan massa atau volume bahan bakar. Nilai kalor ini diuji menggunakan alat *Bomb Calorimetric* (Oxygen Combustion Bombs, 1108 Oxygen Combustion Vessel, Parr Instrument Company, Moline, United States) yang secara otomatis menghasilkan nilai kalor dengan satuan MJ/kg (Haryanto *et al.*, 2021). Analisis ini mengikuti SNI 01-6235:2000, untuk hasil mengacu pada standar SNI 8675:2018 yang menghasilkan nilai kalor dengan satuan MJ/kg.

3.4.3 Pengujian sifat fisik

Kerapatan

Kerapatan adalah perbandingan antara berat dan volume sampel. Kerapatan dilakukan dengan keadaan pelet kering udara dan juga kering oven (Hidayat *et al.*, 2021) Pengukuran dapat dilakukan dengan mengukur luas permukaan dan panjang untuk mendapatkan volume pelet dan menimbang massa pelet dalam kering udara seperti yang dilakukan pada Gambar 7. Berdasarkan SNI 8021:2014, kerapatan dapat diketahui menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Kerapatan (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Massa Pelet (g)}}{\text{Volume pelet (cm}^3\text{)}}$$



Gambar 7. Pengukuran volume dan menimbang massa pelet kaliandra

3.4.4 Pengujian sifat mekanis

Uji kuat tekan yang dilakukan mengikuti standar ASTM D4179-11 menggunakan alat *universal testing machine* (UTM) (M500-50AT, Testometric, Rochdale, Inggris). Pelet dapat dilakukan pengujian kuat tekan setelah diukur diameternya, kemudian ratakan kedua ujungnya agar dapat berdiri di atas UTM. Pengukuran kuat tekan dengan meletakkan pelet pada UTM dan hitung waktu hingga pelet pecah atau retak. Kemudian, mesin secara otomatis berhenti dan menampilkan

grafik dan nilai maksimum pada pengujian seperti yang dilakukan pada Gambar 8. Nilai kuat tekan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Kuat tekan (N/mm}^2\text{)} = \frac{\text{Tekanan maksimum (N)}}{\text{Luas permukaan sampel (mm}^2\text{)}}$$



Gambar 8. Pengujian kuat tekan menggunakan *universal testing machine (UTM)*

3.4.5 Analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

FTIR bertujuan untuk menentukan kualitas biomassa dan perubahan gugus fungsi. FTIR dilakukan menggunakan spektroskopi *Fourier transform infrared* (Scimitar 2000, Varian, Palo Alto, Amerika Serikat) dengan metode KBr. Persiapan sampel yang dianalisis terlebih dahulu dikonversi dalam bentuk serbuk menggunakan blender. Pada setiap pengujian digunakan sampel seberat 6 g.

3.5 Analisis data

Analisis data menggunakan analisis statistik yang menghasilkan informasi terkait hasil dari setiap variable penelitian yang dilihat dari rata-rata (*mean*), nilai maksimum, nilai minimum, serta standar deviasi untuk mengetahui karakteristik dari sampel penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abqoriyah, Utomo, R., Suwignyo, B. 2015. Produktivitas tanaman kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) sebagai hijauan pakan pada umur pemotongan yang berbeda. *Buletin Peternakan*. 39(2): 103–108.
- Acda, M. N. 2015. Physico-chemical properties of wood pellets from coppice of short rotation tropical hardwoods. *Journal Fuel*. 160: 531–533.
- Agil, M. 2021. Identifikasi tumbuhan famili leguminosae sebagai penyusun struktur vegetasi hutan kayu putih. *Borneo Journal of Science and Mathematics Education*. 1(1): 7–16.
- Aji, S., Muchammad, M., Iskandar, N. 2022. Karakterisasi pelet biomassa berbahan cocopeat sebagai bahan bakar alternatif. *Jurnal Teknik Mesin*. 10(4): 575–580.
- Allifah, S., Syaikat, Y., Wijayanto, P. 2022. Dampak tenaga air dan bahan bakar fosil terhadap implementasi ekonomi hijau di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 9(3): 102–112.
- Alpian, Rivaldi, Nuwa, Supriyati, W., Luhan, G., Surasana, I. N. 2023. Karakteristik pelet kayu laban (*Vitex pubescens*) sebagai bahan bakar alternatif terbarukan. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*. 40(1): 23–34.
- Amirta, R. 2018. *Pelet kayu energi hijau masa depan*. Mulawarman University Press. Samarinda. 81 hlm.
- Amirta, R., Anwar, T., Sudrajat, Yuliansyah, Suwinarti, W. 2018. Trial production of fuel pellet from acacia mangium bark waste biomass. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 144(1): 1–8.
- Arhamsyah. 2010. Pemanfaatan biomassa kayu sebagai sumber energi terbarukan. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 2(1): 42–48.
- Arsyad, E. 2014. Sifat fisik dan kimia wood pellet dari limbah industri perikanan sebagai sumber energi alternatif. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*. 6(1): 1–8.

- Azhar, M., Satria, D. A. 2018. Implementasi kebijakan energi baru dan energi terbarukan dalam rangka ketahanan energi nasional. *Administrative Law & Governance Journal*. 1(4): 398–412.
- Azhar, M., Rustamaji, H. 2009. Bahan bakar padat dari biomassa bambu dengan proses torefaksi dan densifikasi. *Jurnal Rekayasa Proses*. 3(2): 26-29.
- Bazenet, R. A., Hidayat, W., Ridjayanti, S. M., Riniarti, M., Banuwa, I. S., Haryanto, A., Hasanudin, A. 2021. Pengaruh kadar perekat terhadap karakteristik briket arang limbah kayu karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 10(3): 283–295.
- Brick, M., Janic, T. 2009. Standards for pelleted and briquetted biofuels standar di za peletirana i briketirana biogoriva. *Savremena Poljoprivredna Tehnika*. 34(4): 219–280.
- Budiati. 2021. *Budidaya Hijauan Pakan Ternak Unggul*. Elementa Agro Lestari. Jakarta Utara. 54 hlm.
- Daning, D. R. A., Foekh, B. 2018. Evaluasi produksi dan kualitas nutrisi pada bagiam daun dan kulit kayu *Calliandra callotirsus* dan *Gliricidia sepium*. *Sains Peternakan*. 16(1): 7–11.
- Darmawan, U. W. 2012. Pengembangan kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) sebagai kayu energi. *Mitra Hutan Tanaman*. 7(2): 71–75.
- Darmawan, K., Setiawan, A. A., Dewayanto, N. 2023. Potensi perbandingan pemanfaatan kaliandra (*Calliandra callothyrsus*) dan gamal (*Gliricidia sepium*) sebaga co-firing untuk pemenuhan kebutuhan bahan bakar PLTU Sudimoro Pacitan. *Jurnal Altron*. 2(2): 01–09.
- Dharmaputri, N. W. P., Wijaya, I. N., Adiartayasa, W. 2016. Identifikasi mikoriza vesikular arbuskular pada rhizosfer tanaman lamtoro (*Leucaena leacecophala*) dan kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) serta perbanyakannya dengan media zeolit. *E-Jurnal Agroekoteknologi Tropika*. 5(2): 171–180.
- Eckholm, E. P. Smith, N., Dick., H. W. Soedarmo, D. P. 1984. *Krisis Energi : Kayu Sumber Daya Pembaharu*. Yayasan Obor Indonesia. Jakarta. 55 hlm.
- Edi, A., Rujehan, Ibrahim, Imang, N., Sardjono, M. A., Kristiningrum, R. 2024. Analisis tingkat kesesuaian lahan dan finansial pembangunan tanaman energi kaliandra (*Calliandra callothyrsus*) di lokasi bekas tambang batubara PT Padangsubur Biomassa Kaltim. *Jurnal Hutan Tropis*. 8(1): 1–9.
- Febijanto, I. 2018. Perencanaan PLTU biomassa berbahan bakar tanaman kaliandra merah di Kalimantan Timur. *Jurnal Energi dan Lingkungan*. 12(1): 31–36.

- Febrianti, N., Filiana, F., Hasanah, P. 2020. Potensi sumber energi terbarukan dari biomassa yang berasal dari sumber daya alam di Balikpapan. *Jurnal Presipitasi*. 17(3): 316–323.
- Frida, E., Darnianti, D., Pandia, J. 2019. Preparasi dan karakterisasi biomassa kulit pinang dan tempurung kelapa menjadi briket dengan menggunakan tepung tapioka sebagai perekat. *JUITECH: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Quality*. 3(2): 1–8.
- Frodeson, A., Henriksson, G., Bergel, J. 2019. Effects of moisture content during densification of biomass pellets, focusing on polysaccharide substances. *Biomass and Bioenergy*. 122: 322–330.
- Giyanto, G. 2020. Kajian preferensi penggunaan kompor biomassa pelet kayu sebagai alternatif pengganti tungku tradisional. *Prosiding Seminar Nasional NCIET*. 1(1): 6–19.
- Gufron, M., Bahri, M. H., Fathonisyam, A. 2023. Analisa kadar air, densitas bulk dan pembakaran pada pelet biomassa ampas tebu variasi ukuran partikel dan penambahan bahan aditif (zeolit, karbon aktif). *Jurnal Smart Teknologi*. 4(2): 220–230.
- Gunawan, I., Muharyani, N., Hendrasetiafitri, C. 2023. Reducing the ash content of gliricidia (*Gliricidia sepium*) and calliandra (*Calliandra calothyrsus*) wood pellets through debarking and mixing with acacia (*Acacia mangium*) and pines (*Pinus merkusii*) wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1187: 1–5.
- Hardiatmi, J. S. 2010. Investasi tanaman kayu sengon dalam wanatani cukup menjanjikan. *Jurnal Inovasi Pertanian*. 9(2): 17–21.
- Harianto, S., Atmaja, M. I. P., Shabri, Maulana, H., Rohdiana, D., Rosyadi, A. I. 2018. Karakteristik pelet kayu dari limbah pangkasan teh berdasarkan besaran partikel. *Jurnal Penelitian Teh dan Kina*. 21 (1): 18–25.
- Haryanti, N. H., Suryajaya, S., Wardhana, H., Noor, R. 2019. Utilization of coal bottom ash as briquette material. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 4(3): 113-124.
- Haryanto, A., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., Hidayat, W. 2021. Biomassa 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., Hassanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D. A., Triyono, S., Amrul., Wisnu, F. K. Torefaction to improve

biomassa pellet made of oil palm empty fruit bunch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 749: 012047.

- Hasna, A. H., Sutapa, J. P. G., Irawati. 2019. Pengaruh ukuran serbuk dan penambahan tempurung kelapa terhadap kualitas pelet kayu sengon. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 13: 170–180.
- Hendra, D. 2012. Rekayasa pembuatan mesin pelet kayu dan pengujian hasilnya. *Penelitian Hasil Hutan*. 30: 144–154.
- Hendrati, R. L., Hidayati, N. 2014. *Budidaya Kaliandra (Calliandra calothyrsus) Untuk Bahan Baku Sumber Energi*. IPB Press. Jakarta. 28 hlm.
- Heriansyah, I. 2005. Potensi pengembangan energi dari biomassa hutan di Indonesia. *INOVASI*. 5(17): 34–38.
- Herlambang, S., Rina, S., Purwono, A. Z., Sutiono, H. T. 2017. *Biomassa Sebagai Sumber Energi Masa Depan*. Gerbang Media Aksara. Yogyakarta. 81 hlm.
- 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: 6961–6974.
- Hidayat, W., Pah, J. M., Suryanegara, L., Hasanudin, U., Haryanto, A., Wulandari, C. 2022. Production and characterization of andong bamboo (*Gigantochloa pseudoarundinacea* (Steudel) Widjaja) pellets from various stem parts. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 11(4): 713–723.
- 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., Rani, I. T., Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Lee, S. H., Kim, S. D., Yoo, J. H., Haryanto, A. 2020. 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., Rubiyanti, T., Sulistio, Y., Iryani, D. A., Haryanto, A., Amrul., Yoo, J., Kim, S., Lee, S., Hasanudin, U. 2021. Effect 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*. 202: 209–213.
- Hidayat, W., Wijaya B. A., Saputra, B., Rani, I. T., Kim, S., Lee, S., Yoo, J., Park, B. B., Suryanegara, L., Lubis, M. A. R. 2024. Torrefaction of bamboo

- pellets using a fixed counterflow multibaffle reactor for renewable energy applications. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 10(1): 1–20.
- Hidayatullah, A. H., Sutapa, J. P. G., Listyanto, T. 2022. Pengaruh ukuran partikel bahan baku terhadap kualitas pelet ranting kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) dari limbah pakan ternak kambing. *Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*. 20: 31-39.
- 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.
- Irawansyah, H., Nugraha, A., Afifudin, M. N., Al'risiko, R. N. 2021. Pengaruh variasi ukuran serbuk (mesh) dan presentase perekat tapioka terhadap sifat fisik pelet kayu gelam. *Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah*. 15(2): 11–20.
- Iriany, Hasibuan, R., Novita, D., Ummah, N. M. 2023. Pengaruh komposisi bahan baku dan ukuran partikel terhadap kualitas biobriket dari cangkang buah karet dan ranting kayu. *Jurnal Teknik Kimia*. 12(1): 1–8.
- Iryani, D. A., Halimatuzzahra, H., Taharuddin, Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U. 2023a. Physicochemical Characterization of Wood Mixed with Coffee Waste Pellet. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1187(1): 1–9.
- Iryani, D. A., Rakaseri, I., Azhar, A., Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U. 2023b. Thermogravimetric assessment for combustion characteristic of torrefied pellet biomass from agricultural solid waste. *International Conference on Biomass and Bioenergy*. 1187(1): 12019.
- Iskandar, N., Nugroho, S., Feliyana, M. F. 2019. Uji kualitas produk briket arang tempurung kelapa berdasarkan standar mutu SNI. *Momentum*. 15(2): 103–108.
- Istirokhatun, T., Wardhana, I. W., Primelya, A. 2011. Analisis pengaruh kelembapan kayu terhadap konsentrasi PM 2,5 dalam dapur berbahan bakar kayu skala replikasi dan rumah tangga. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*. 8(1): 8–13.
- Japanese Agricultural Standards. 2021. *Japan Proposes New JAS Standards for Wood Pellets For Nonindustrial Use*. United States Departement of Agriculture Foreign Agricultural Service. Tokyo. 4 hlm.
- Junary, E., Pane, J. P., Herlina, N. 2015. Pengaruh suhu dan waktu karbonisasi terhadap nilai kalor dan karakteristik pada pembuatan bioarang berbahan baku pelepah aren (*Arenga pinnata*). *Jurnal Teknik Kimia USU*. 4(2): 46–52.

- Karunanithy, C., Wang, Y., Muthukumarappan, K., Pugalendhi, S. 2012. Physiochemical characterization of briquettes made from different feedstocks. *Biotechnology Research international* 2012. 1: 1–12.
- Kirsten, C., Lenz, V., Schroder, 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.
- Kisworo, A. N., Sugandi, A., Endrakasih, E., Putra, K., Sudrajat, Riyanti. 2019. *Pemanfaatan kaliandra merah (Calliandra calothyrsus) dalam high energy protein tannin supplement untuk antiparasit (Kajian in vitro)*. Laporan penelitian. Politenik Pembangunan Pertanian Bogor. Bogor. 34 hlm.
- Korea Forest Research Institute. 2014. *Standard and Specification of Wood Products*. Korea Forest Service. Busan. 106 hlm
- Korhaliller, S. 2010, *The UK's Biomassa Energy Development Path*. International Institute for environment and Development (IIED). UK. 44 hlm.
- Lensari, D., Yuningsih, L., Rosalia, I. 2022. Pertumbuhan bibit kaliandra pada media semai lahan pasca tambang batu bara. *Prosiding Seminar Nasional Silvikultur ke-VIII*. 14(1): 275–285.
- Lestari, V.A., Priambodo, T.B. 2020. Kajian komposisi lignin dan selulosa dari limbah kayu sisa dekortikasi rami dan cangkang kulit kopi untuk proses gasifikasi downdraft. *Jurnal Energi dan Lingkungan*. 16(1): 1-8.
- 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.
- Mandari, D. Z., Gunawan, H. Isda, M. N. 2016. Penaksiran biomassa dan karbon tersimpan pada ekosistem hutan mangrove di kawasan Bandar Bakau Dumai. *Jurnal Riau Biologi*. 1(3): 17–23.
- Maulana, A. F., Utomo, S., Lestari, P., Arifriana, R., Susanto, D., Dewi, N. A. C., Nugroho, A., Prasetyo, E., Pramono, R. F., Saputro, W. C., Sulistyowati, D. 2021. Potensi kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) dan gamal (*Gliricidia sp.*) di Daerah Istimewa Yogyakarta untuk pengembangan pelet kayu. *Agrifor* 10: 71–80.
- Maulana, M. I., Jeon, W. S., Purusatama, B. D., Nawawi, D. S., Nikmatin, S., Sari, R. K., Hidayat, W., Febrianto, F., Kim, J. H., Lee, S. H., Kim, N. H. 2021. Variation of anatomical characteristics within the culm of the three *Gigantochloa* species from Indonesia. *BioResources*. 16(2). 3596-3606.

- Maulidani, A., Hatta, G. M., Arifin, Y.F. 2019. Studi daya kualitas hidup kaliandra merah (*Calliandra calothyrsus*) pada tiga jenis tanah di areal reklamasi bekas penambangan semen. *Jurnal Sylva Scientiae*. 2(3): 540–547.
- Mauritio, P., Duryat, Riniarti, M., Hidayat, W. 2023. Pengaruh variasi suhu torefaksi terhadap perubahan warna dan sifat fisik pelet kaliandra (*Calliandra calothyrsus*). *Warta Rimba: Jurnal Ilmiah Kehutanan*. 10(5): 1–7.
- Mpapa, B. L., Sudarmaji, I. 2018. Unsur hara tanah dan jaringan tanaman kehutanan jenis cepat tumbuh dan lambat tumbuh. *Jurnal Hutan Tropis*. 6(1): 28–34
- Mujiono, D., Akbar, Z. A., 2023. Analisis teknik dan keekonomian pengolahan biomassa sawdust dari hutan tanaman energi (HTE) untuk mendukung program Co-firing di PLTU Pelabuhan Ratu. *Journal of CIVED*. 10(2): 460–473.
- Murtadha, A. W. M. 2022. *Multiplikasi kaliandra merah (Calliandra calothyrsus) pada beberapa konsentrasi BAP dan IAA*. Skripsi. Universitas Hasanuddin Makasar. Makasar. 37 hlm.
- 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.
- Nugraha, A., Irwansyah, H., Afifudin, M. N., Al'arisko, R. N. 2022. Pengaruh variasi ukuran serbuk dan presentase perekat terigu terhadap sifat fisik pellet kayu gelam. *TURBO*. 11(1): 47–54.
- Nugraha, Andy, Widodo, A., Wahyudi, S. 2017. Pengaruh tekanan pembriketan dan persentase briket campuran gambut dan arang pelepah daun kelapa sawit terhadap karakteristik pembakaran briket. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 8(1): 29–36.
- Nur, S. M., Yandri, E. 2022. *Sistem bioenergi untuk industri pellet kayu strategi dan teknik penerapan konsep sistem bioenergi berkelanjutan untuk industri pellet kayu*. Lakeisha. Klaten. 99 hlm.
- Pah, J. M., Suryanegara, L., Haryanto, A., Hasaunin, 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*. 202: 185-189.
- Panwar, V., Prasad, B., Wasewar, K. L. 2011. Biomass residue briquetting and characterization. *Journal of Energy Engineering*. 137(2): 108–114.

- Papilo, P., Kunaifi, Hambali, E., Nurmaiti, Pari, R.F. 2015. Penilaian potensi biomassa sebagai alternatif energi kelistrikan. *Jurnal PASTI*. 9(2): 164–176.
- Parinduri, L., Parinduri, T., 2020. Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technologi*. 5: 88–92.
- Permatasari, D., Rahmawati, W., Haryanto, A. 2023. Pengaruh ukuran partikel dan perekat tapioka terhadap sifat biopelet dari limbah serbuk gergajian. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*. 2(2): 242–249.
- Pradana, W., Bunyamin, A., 2021. Pemanfaatan kayu kaliandra dan limbah sebagai bahan baku biobriket. *Teknologi Pertanian Andalas*. 25: 116–119.
- Prasetyo, E., Wiyono, Lestari, P., Hidayat, R., Oktalina, S. N., Ngadianto, A., Nugroho, P. 2018. Penanaman kaliandra sebagai kayu energi dan hijauan makanan ternak pada pertanaman agroforestri masyarakat Desa Gebongsari, Samigaluh Kulon Progo. *Jurnal Pengabdian dan Pengembangan Masyarakat*. 1(1): 1–9.
- Pratiwi, Narendra, B. H., Hartoyo, G.M.E., Kalima, T., Pradjadinata, S. 2014. *Atlas Jenis Jenis Pohon Andalan Setempat Untuk Rehabilitasi Hutan dan Lahan di Indonesia*. Pusat Litbang Konservasi dan Rehabilitasi. Bogor. 82 hlm.
- Prayitno, J., Violet, Kurdiansyah. 2020. Karakteristik pelet kayu karet (*Havea brasiliensis*) di Desa Danau Salak kabupaten Banjar Kalimantan Selatan. *Jurnal Sylva Scientiae*. 3(6): 1112–1122.
- 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.
- Putra, D. R., Yoegiantoro, D., Thamrin, S. 2020. Kebijakan ketahanan energi berbasis energi listrik pada bidang transportasi guna mendukung pertahanan negara di Indonesia: sebuah kerangka konseptual. *Jurnal Ilmu Pengetahuan Sosial*. 7(3): 658–672.
- Putri, R. E., Andasuryani. 2017. Studi mutu briket arang dengan bahan baku limbah biomassa. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*. 21(2): 143–151.
- Rahayu, S., Hilyana, S., Suryani, E., Sari, N. H., Ali, M. 2020. Analysis of wood pellet quality from *Calliandra calothyrsus*, *Gliricidia sepium*, and sawdust as new and renewable energy. *Proceedings International Conference on Science and Technology*. 1: 110–115.

- Rahman. 2011. *Uji Keragaan biopelet dari biomassa limbah sekam padi (Oryza sativa sp.) sebagai bahan bakar alternatif terbarukan*. Skripsi. Institut Pertanian Bogor. Bogor. 67 hlm
- Rani, I. T., Hidayat, W., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Haryanto, A., Hasanudi, U. 2020. Pengaruh torefaksi terhadap sifat kimia pelet tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(1): 63–70.
- Rani, I. T., Yoo, J., Park, B. B., Hidayat, W., Wijaya, B. A., Lee, S., Kim, S., Choi, H., Chun, D., Im, H., Kim, S. 2023. Wood pellet driven-biochar characterization produced at different targeted pyrolysis temperatures. *Jurnal Sylva Lestari*. 11(3): 558–571.
- 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): 511.
- Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y., dan Firmansyah, F. 2019. Pengaruh jenis biomassa pada pembakaran pirolisis terhadap karakteristik dan efisiensi bioarang - asap cair yang dihasilkan. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 20(1): 18-27
- Rosaira, I., Hermawati, W., Putera, P., B. 2014. *Implementasi Teknologi Energi Biomassa di Tingkat Industry di Indonesia*. LIPI Press. Jakarta. 28 hlm.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryani, I. G., Bakri, S. 2019. Karakterisasi pelet kayu (*Hevea brasiliensis*) hasil torefaksi dengan menggunakan reaktor counter-flow baffle (COMB). *Jurnal Sylva Lestari*. 7(3): 321–331.
- Rudini, A. Kurniawan, A. 2021. *Analisa pengaruh kadar air dan nitrogen pada limbah biomassa sekam padi dengan variasi serbuk kayu jati dan serbuk kayu sengon terhadap nilai kalor berbasis blinded method*. Thesis. Institute Teknologi Nasional. Malang. 7 hlm.
- Sapriyanto, B. A., Sutapa, G. 2018. *Pengaruh variasi jenis bahan baku dan ukuran partikel terhadap kualitas pelet kayu gamal (gliricidia sepium)*. Skripsi. Universitas Gadjah Mada. Jogjakarta. 79 hlm.
- Saputra, N. A., Syafii, W, Pari, G, Nawawi, D. S., Maddu, A. 2023. Preparation and application of a novel adsorbent from red calliandra hydrochar for pollutant remediation. *South African Journal of Chemical Engineering*. 46: 351–360.
- Saputra, B., Tambunan, K. G. A., Suri, I. F., Febryano, I. G., Iswandaru, D., Hidayat, W. 2020. Effects of torrefaction temperature on the characteristics

- of betung (*Dendrocalamus asper*) bamboo pellets. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 11(2): 339–353.
- Saputro, M. W., Burmawi. 2022. Analisis nilai kalor pellet energi dari limbah kayu pohon kelapa dengan perekat tepung tapioka. *Abstrak dan Ringkasan Jurnal Teknik Mesin*. 19(2).
- Setyana, E. Y. Lomi, L. Saleh, C. 2021. Penggunaan wood pellet untuk bahan bakar produksi tahu di ukm Kab. Kediri. *Jurnal Aplikasi Sains Teknologi Nasional*. 2(2): 22–28.
- Sidabutar, V. T. P. 2018. Kajian peningkatan potensi ekspor pelet kayu Indonesiasebagai sumber energi biomassa yang terbarukan. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 12: 99–166.
- Simanjuntak, M. E. 2011. Simulasi pengaruh kadar air terhadap penghematan konsumsi serat kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler. *Teknuka: Jurnal Sains dan Teknologi*. 7(1) : 5–16.
- Standarisasi Nasional Indonesia. 2018. Pelet biomassa untuk energi. Badan Standarisasi Nasioanl. Jakarta.
- Sondakh, R. C., Hayatudin, Ernawati. 2022. Perbandingan biomassa pertanian sebagai energi terbarukan briket arang. *Jurnal Ilmiah GIGA*. 25(1): 45–52
- Soolany, C. 2020. Rancang bangun pencetak briket tipe screw untuk proses produksi briket pelet dari arang cangkang kakao. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. 6(2): 62-68.
- Suganal, S., Hudaya, G. K. 2019. Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket (skala laboratorium). *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 15(1): 31–48.
- Sukarta, I. N., Ayuni, P. S. 2016. Analisis proksimat dan nilai kalor pada pelet 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.
- Sutapa, J. P.G. Hidayatullah, A. H. 2023. Torrefaction for improving quality of pellets derived from calliandra wood. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 51(5): 381–391.
- Suwadji, S., Pebriana, H. 2018. Sifat wood pellet dari limbah kayu jati. *Jurnal Wana Tropika*. 8(2): 47-58.

- Syamsiro, M. 2016. Peningkatan kualitas bahan bakar padat biomassa dengan proses densifikasi dan torrefaksi. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*. 1(1): 7–13.
- Tambunan, K. G. A., Saputra, B., Suri, I. F., Febryano, I. G., Bintoro, A., Hidayat, W. 2023. Perubahan sifat fisis dan mekanis pelet bambu andong (*Gigantochloa pseudoarundinaceae*) setelah perlakuan torrefaksi. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*. 17(1): 11–20
- Terzopoulou, P., Kamperidou, V., Lykidis, C. 2022. Cypress wood and bark residues chemical characterization and utilization as fuel pellets feedstock. *Forests*. 13(8): 2–18.
- Tsandra, N. A., Sunaryo, R. P., Syafr, Octaviani, O. 2023. Pengaruh konsumsi energi dan aktivitas ekonomi terhadap emisi CO₂ di negara G20. *EJournal Ekonomi Bisnis dan Akuntansi*. 10 (2): 69-79.
- Ulfah, D., Lusyani, Thamrin, G. A. R., Rahmiyat. 2021. Kualitas biopellet limbah sekam padi (*Oryza sativa*) sebagai salah satu solusi dalam menghadapi krisis energi. *Jurnal Hutan Tropis*. 9(2): 412–424.
- Wahyullah, Putra, O. D., Ismail. 2018. Pemanfaatan biomassa tumbuhan menjadi biopellet sebagai alternatif energi terbarukan. *Hasanuddin Student Journal*. 2(1): 239–247.
- Wibowo, A. S., 2018. *Snack bar berbasis tepung koro benguk (Mucuna pruriens) dan ubi jalar kuning (Ipomoea batatas) ditinjau dari karakteristik kimia dan sensori*. Skripsi. Universitas Katolik Soegijapranata. Semarang. 52 hlm.
- Wibowo, N. I., Madya, W. 2020. Pemanfaatan teknologi tepat guna kompor roket dengan formulasi bahan pelet kayu dan kayu sengon. *Agroscience*. 10: 136–147.
- Wibowo, S., Laia, D. P. O., 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.
- Widjaya, E. R., Chen, G., Bowtell, L., Hills, C. 2018. Gasification of non-woody biomass: A literature review. *Renewable and Sustain Energy Reviews*. 89: 184–193.
- Yokoyama, S. 2008. *Asian Biomass Handbook*. The Japan Institute of energy. Tokyo. 351 hlm.

- Yudha, R. S., Komalasari, Helwani, Z. 2017. Proses densifikasi pelepah sawit menggunakan crude gliserol sebagai filler menjadi bahan bakar padat. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik dan Sains*. 4(1): 1–4.
- Yuliah, Y., Suryaningsih, S., Ulfi, K. 2017. Penentuan kadar air hilang dan volatile matter pada bio-briket dari campuran arang sekam padi dan batok kelapa. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*. 1(1): 51-57.
- 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.
- Zahira, N. P., Fadillah, D. P. 2022. Pemerintah menuju target net zero emission (NZE) tahun 2060 dengan variable renewable energy (VRE) di Indonesia. *Jurnal Ilmu Nasional*. 2: 114–119.
- Zubairu, A., Gana, S. A. 2014. Production and characterization of briquette charcoal by carbonization of agro-waste. *Energy Power*. 4(2): 41–47.