



THE IMPACT OF CARBONIZATION TEMPERATURE ON THE QUALITY OF EMPTY FRUIT BUNCH CHARCOAL AND PALM KERNEL CHARCOAL FOR CO-FIRING APPLICATION

Annisa Vada Febriani¹⁾, Farrah Fadhilah Hanum^{1)*}, Aster Rahayu¹⁾, Budi Setya Wardhana¹⁾ dan Firda Mahira Alfiata Chusna²⁾

¹⁾Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Ahmad Dahlan University, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Daerah Istimewa Yogyakarta 55191, Indonesia;

²⁾Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Ahmad Dahlan University, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Daerah Istimewa Yogyakarta 55191, Indonesia;

ARTICLE INFO

Article history:

Received 08 Nov 2024,

Revised 11 Jan 2025,

Accepted 16 Jan 2025,

Available online 30 Jan 2025

Keywords:

- ✓ biomass;
- ✓ charring temperature;
- ✓ charcoal quality;
- ✓ calorific value;
- ✓ co-firing

*corresponding author:

farrah.hanum@che.uad.ac.id

Phone: +62 813-7034-5816

[https://doi.org/10.31938/jsn.v](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i1.766)

[15i1.766](https://doi.org/10.31938/jsn.v15i1.766)

ABSTRACT

Biomass is a renewable energy source that can be processed into charcoal through a carbonisation process, which depends on temperature to improve the quality of the charcoal produced. This research focuses on the utilisation of Oil Palm Fronds (OPF) and Palm Kernel Shells (PKS) as biomass feedstock in an effort to produce an alternative fuel that can be used in the co-firing process with Low Rank Coal (LRC). This study heats palm fronds and shells at 300°C to 600°C, then measures moisture content, ash content, calorific value, and sulfur content. Based on the results, a temperature of 600°C was identified as the optimal condition for the OPF and PKS drying process. At this temperature, a significant decrease in moisture content is directly proportional to the increase in ash content and calorific value, indicating an improvement in fuel quality. The highest calorific values achieved were 6095.35 kcal/kg for OPF and 7364.81 kcal/kg for PKS. In addition, the sulphur content of the charred biomass is much lower than that of coal, which provides an advantage in terms of cleaner emissions. In comparison with LRC, the charred biomass showed better quality in terms of calorific value and lower sulphur content, despite the higher ash content of the biomass. OPF and PKS that have undergone the charring process offer a more environmentally friendly fuel alternative and have the potential to replace LRC in combustion applications, resulting in lower emissions. This study thus reinforces the potential of oil palm biomass as a promising renewable energy source.

Pengaruh Suhu Pembakaran Pada Kualitas Arang Pelepah dan Cangkang Kelapa Sawit untuk Aplikasi Co-Firing

ABSTRAK

Biomassa adalah sumber energi terbarukan yang dapat diolah menjadi arang melalui proses karbonisasi, yang bergantung pada suhu untuk meningkatkan kualitas arang yang dihasilkan. Penelitian ini berfokus pada pemanfaatan pelepah kelapa sawit (OPF) dan cangkang kelapa sawit (PKS) sebagai bahan baku biomassa dalam upaya menghasilkan bahan bakar alternatif yang dapat digunakan dalam proses *co-firing* dengan *Low Rank Coal* (LRC). Penelitian ini dilakukan dengan memanaskan pelepah dan cangkang kelapa sawit pada suhu 300°C hingga 600°C. Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh suhu optimal untuk proses pengeringan OPF dan PKS di 600°C, yang didasarkan pada uji kadar air, kadar abu, nilai kalor, dan kadar sulfur. Pada suhu ini, penurunan kadar air yang signifikan berbanding lurus dengan peningkatan kadar abu dan nilai kalor, menunjukkan peningkatan kualitas bahan bakar. Nilai kalor tertinggi yang dicapai adalah 6095,35 kcal/kg untuk OPF dan 7364,81 kcal/kg untuk PKS. Selain itu, kadar sulfur biomassa hasil pengarangan jauh lebih rendah dibandingkan dengan batubara, yang memberikan keuntungan dalam hal emisi yang lebih bersih. Dalam perbandingan dengan LRC, biomassa hasil pengarangan menunjukkan kualitas yang lebih baik dalam hal nilai kalor dan kandungan sulfur yang lebih rendah, meskipun kadar abu biomassa lebih tinggi. OPF dan PKS yang telah melalui proses pengarangan menawarkan alternatif bahan bakar yang lebih ramah lingkungan dan berpotensi menggantikan LRC dalam aplikasi pembakaran, dengan menghasilkan emisi yang lebih rendah. Sehingga penelitian ini memperkuat potensi biomassa kelapa sawit sebagai sumber energi terbarukan yang menjanjikan.

Kata kunci: biomassa; *co-firing*; suhu pengarangan; kualitas arang; nilai kalor



PENDAHULUAN

Biomassa adalah sumber energi alternatif terbarukan yang berasal dari tanaman dan limbah. Biomassa dapat diolah menjadi arang melalui proses karbonisasi (Kurniawan et al., 2022). Temperatur dalam proses karbonisasi sangat mempengaruhi kualitas arang yang dihasilkan, sehingga pemilihan temperatur yang tepat sangat penting untuk menentukan mutu arang tersebut (Irbah et al., 2022). Karbonisasi (pengarangan) adalah pembakaran tak sempurna dengan jumlah udara terbatas pada bahan yang mengandung karbon. Selama karbonisasi, terjadi penyusutan pada sampel karena pemanasan yang diberikan menghilangkan partikel-partikel dalam bahan, sehingga yang tersisa hanyalah arang (Hasanah, 2021). Dalam hal ini, pemanfaatan limbah padat perkebunan kelapa sawit menjadi salah satu cara efektif untuk mengolah biomassa menjadi energi terbarukan yang bernilai tinggi (Paranita, 2020). Pemerintah Indonesia menetapkan kebijakan untuk meningkatkan keberlanjutan industri kelapa sawit yang dikenal dengan *Indonesian Sustainable Palm Oil* (ISPO). Kebijakan ini bertujuan untuk meningkatkan daya saing minyak sawit Indonesia di pasar global serta mendukung program pengurangan emisi gas rumah kaca. Salah satu strategi pengurangan emisi gas rumah kaca yaitu dengan menggunakan bahan bakar nabati atau limbah untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil (SOP Mitigasi GRK, 2019).

Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), mayoritas batubara di Indonesia terdiri dari batubara kelas *lignit* dan *subbituminus* yang tergolong dalam kategori *Low Rank Coal* (LRC). LRC dianggap sebagai bahan bakar kualitas rendah untuk pembakaran karena kandungan bahan mineralnya yang tinggi, kadar air yang tinggi dan nilai kalor rendah (≤ 5100 kcal/kg) (Zhang et al., 2020). Jenis batubara ini rata-rata memiliki kandungan air sekitar 30% - 50% yang apabila dibakar langsung di boiler dapat memberikan dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan maupun kesehatan (Hapsauqi et al., 2024). Oleh karena itu, kementerian ESDM menyusun program teknologi hilirisasi pemanfaatan batubara kualitas rendah yang salah satunya adalah program *co-firing* batubara dan biomassa. *Co-firing* merupakan pencampuran biomassa dengan batubara dalam *boiler* pembangkit listrik. Program ini memanfaatkan biomassa sebagai bahan bakar tambahan untuk mengurangi emisi karbon dioksida dan polutan, sekaligus memanfaatkan

energi terbarukan (Febriani et al., 2024; Febriani et al., 2024).

Biomassa dari sektor perkebunan kelapa sawit seperti pelepah sawit merupakan salah satu limbah biomassa yang cukup banyak dihasilkan dan dibiarkan membusuk tanpa adanya pengolahan lebih lanjut di perkebunan kelapa sawit (Ridaldy et al., 2021). Dari area seluas satu hektar kebun kelapa sawit menghasilkan sekitar 10 ton pelepah per tahun. Jumlah pelepah yang besar ini berpotensi menimbulkan masalah lingkungan serta membutuhkan ruang dan biaya jika tidak diolah atau dimanfaatkan secara optimal. Namun, kandungan utama dalam pelepah ini, yaitu hemiselulosa sebesar 35,9%, selulosa 33,7%, dan lignin 17,4%, menjadikannya bahan baku yang potensial untuk biomassa (Prasetyo, 2023; Purwaningsih et al., 2024). Pelepah kelapa sawit kini banyak diteliti sebagai sumber energi alternatif dengan diolah menjadi briket dengan melalui tahap pengarangan terlebih dahulu (Zidhan et al., 2023). Hasil penelitian menunjukkan bahwa briket pelapah kelapa sawit ini berpotensi untuk dijadikan bahan bakar alternatif melalui analisis nilai kalor, kadar air, kadar abu dan laju pembakaran briket (Muarif et al., 2024; Tampubolon et al., 2024). Selain itu cangkang kelapa sawit membentuk sekitar 5-7% dari berat Tandan Buah Segar (TBS) yang diolah, menghasilkan 50 hingga 70 kg cangkang dari setiap 1 ton TBS (Haryanti et al., 2014). Sama halnya dengan pelepah kelapa sawit, cangkang kelapa sawit juga banyak dimanfaatkan dengan mengolahnya menjadi briket dengan sudah melalui proses pengarangan sebelumnya. Hasil riset menunjukkan cangkang kelapa sawit juga berpotensi untuk dijadikan bahan bakar alternatif berdasarkan kadar air, kadar abu, dan nilai kalornya (Fauzun et al., 2024; Harmiansyah et al., 2023). Namun meskipun proses pembuatan briket ini melibatkan tahapan pengarangan, suhu dalam proses pengarangan tersebut belum dioptimalkan untuk mencapai efisiensi energi yang maksimal.

Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu pengarangan pelepah dan cangkang kelapa sawit terhadap kualitas arang sebagai alternatif bahan bakar pengganti batubara. Analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah uji kadar air, kadar abu, nilai kalor, dan kadar sulfur. Penelitian ini merupakan kajian awal kelayakan penggunaan pelepah dan cangkang kelapa sawit sebagai bahan *co-firing* dengan LRC untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi pembakaran di *boiler*.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah Pelepah Kelapa Sawit/*Oil Palm Frond* (OPF) dan Cangkang Kelapa Sawit/*Palm Kernel Shell* (OPK) yang diperoleh dari perkebunan milik rakyat daerah Sumatera Selatan serta batubara sebagai bahan pembanding dari *stockpile* salah satu tambang di Sumatera Selatan.

Alat-alat yang digunakan dalam berbagai pengujian pada penelitian ini meliputi oven *Memmert UN30* yang digunakan untuk menentukan kadar air pada sampel, *Thermo Scientific Thermolyne Benchtop Muffle Furnace* yang berfungsi untuk mengukur kadar abu melalui proses pembakaran pada suhu tinggi, *Bomb Calorimeter IKA C2000 Basic* yang digunakan untuk mengukur nilai kalor sampel guna menentukan kandungan energi, serta Spektrofotometer UV-VIS *UV1800 Shimadzu* yang dimanfaatkan untuk analisis kadar sulfur dalam sampel.

Metode

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen dilaboratorium dalam 3 (tiga) tahapan proses yaitu preparasi sampel, pengarangan biomassa, dan analisis hasil.

Preparasi Sampel

Sampel dipreparasi dengan melakukan uji karakterisasi yang meliputi kadar air, kadar abu, nilai kalor, dan kadar sulfur. Sebelum itu, batubara dihaluskan terlebih dahulu, sedangkan biomassa dibersihkan dari kotoran yang melekat, lalu diperkecil ukurannya. Data awal sampel yang diperoleh disajikan pada Tabel 1.

Proses Pengarangan

Proses pengarangan diawali dengan melakukan tahap dehidrasi kadar air pada biomassa. Dehidrasi kadar air dilakukan dengan mengeringkan biomassa dalam oven hingga

kering (bobot konstan). Tahap pengarangan dilakukan dalam *furnace* dengan variasi suhu yaitu 300, 400, 500, dan 600 °C selama 2 jam. Sebelum dimasukkan ke dalam *furnace*, biomassa dibungkus menggunakan *aluminium foil* agar terjadi pembakaran tidak sempurna sehingga menghasilkan residu berupa arang. Alur pengarangan disajikan pada Gambar 2.

Analisis

Tahap analisis yang dilakukan meliputi beberapa parameter uji yaitu kadar air, kadar abu, nilai kalor, dan kadar sulfur.

Uji Kadar Air

Kadar air merupakan persentase jumlah air yang terkandung dalam suatu bahan. Untuk pengukuran kadar air pada sampel dilakukan dengan menimbang berat awal sampel kemudian dipanaskan pada suhu ± 180 °C selama 2 jam. Kemudian, sampel didinginkan pada desikator selama 30 menit dan ditimbang berat akhirnya. Untuk menghitung kadar air pada sampel menggunakan standar ASTM D3173-03 dengan rumus berikut:

$$\text{Kadar air} = \frac{a_3 - a_1}{a_2 - a_1} \times 100\%$$

Keterangan: a_1 = berat cawan (g)
 a_2 = berat sampel awal (g)
 a_3 = berat sampel akhir (g)

Uji Kadar Abu

Kadar abu adalah persentase massa dari material yang tersisa setelah bahan bakar padat lainnya dibakar dalam kondisi tertentu. Pengukuran kadar abu dilakukan dengan menimbang 1 gr sampel kemudian memasukkan sampel dalam *furnace* pada suhu 650 °C selama 2 jam, kemudian ditimbang berat akhir. Untuk menghitung kadar abu pada sampel menggunakan standar ASTM D-3174-04 dengan rumus berikut:

$$\text{Kadar abu} = \frac{\text{Berat sampel akhir}}{\text{Berat sampel awal}} \times 100\%$$



(a)



(b)

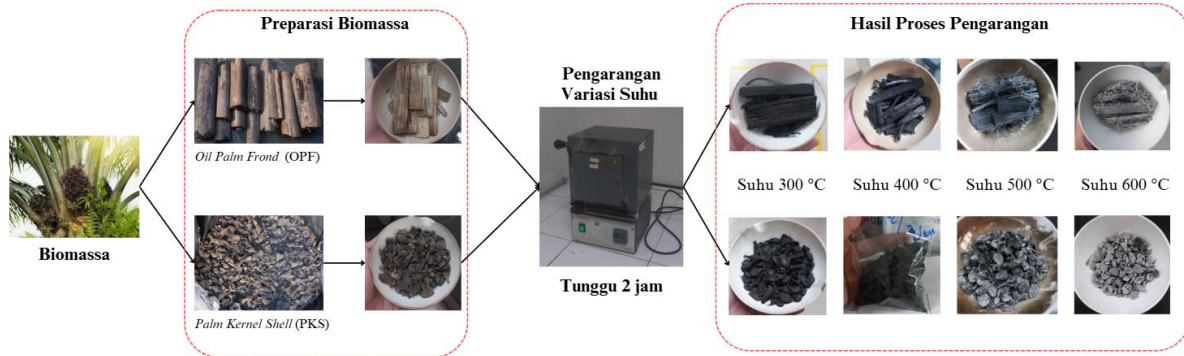


(c)

Gambar 1. Sampel Penelitian: (a) Batubara, (b) Pelepah Kelapa Sawit, dan (c) Cangkang Kelapa Sawit

Tabel 1. Data Sampel Awal

Sampel	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Sulfur (%)	Nilai Kalor (Kal/gr) adb
Batubara	16,03	5,00	0,19	5003,22
Pelepah Kelapa Sawit	15,00	1,92	0,06	3848,88
Cangkang kelapa Sawit	12,67	0,99	0,11	4358,10



Gambar 2. Alur Pengarangan Biomassa

Tabel 2. Standar yang Digunakan dalam Penelitian

Parameter	Baku mutu	Standar
Kadar air (%)	Maksimal 8	SNI 01-6235-2000
Kadar abu (%)	Maksimal 8	SNI 01-6235-2000
Nilai Kalor (kal/g)	Minimal 5000	SNI 01-6235-2000
Kadar Sulfur total (%)	<0,1	SNI 8951:2020

Uji Nilai Kalor

Nilai kalori dalam konteks bahan bakar adalah ukuran jumlah energi yang dapat dilepaskan ketika bahan bakar tersebut dibakar. Nilai kalori yang terkandung dalam batubara maupun biomassa diuji menggunakan bomb calorimeter sesuai dengan ASTM D240.

Uji Kadar Sulfur

Kadar sulfur mengacu pada jumlah total sulfur (belerang) yang terkandung dalam sebuah bahan. Pengukuran ini penting karena kadar sulfur yang tinggi dapat berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia Untuk menghitung kadar sulfur total pada sampel menggunakan standar ASTM D3177-75.

Standar Nasional Indonesia (SNI)

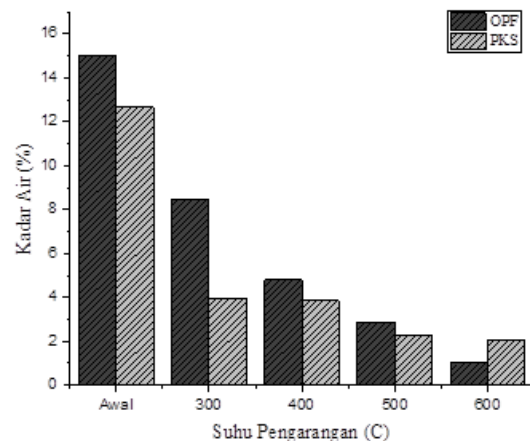
Standar yang digunakan sebagai patokan dalam penelitian ini tersedia pada Tabel 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Suhu Pengarangan Terhadap Kadar Air

Kadar air biomassa adalah persentase air yang terkandung dalam biomassa. Kadar air ini

memengaruhi efisiensi pembakaran dan nilai kalor biomassa. Semakin tinggi kadar air dalam biomassa, semakin rendah efisiensi pembakarannya karena sebagian besar energi akan digunakan untuk menguapkan air sebelum pembakaran yang sebenarnya terjadi (Ariwidyanata et al., 2019). Oleh karena itu, biomassa umumnya dikeringkan atau diawetkan agar kadar airnya rendah sehingga dapat menghasilkan energi yang lebih optimal dan stabil saat digunakan sebagai bahan bakar (Ruing & Sulaiman, 2022).



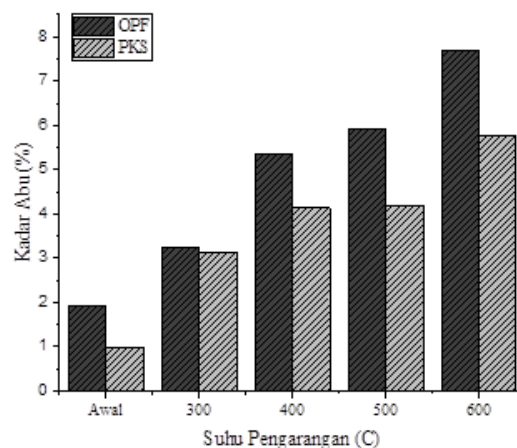
Gambar 3. Pengaruh Suhu Pengarangan Terhadap Kadar Air Biomassa

Pengaruh suhu pengarangan terhadap kadar air biomassa untuk dua jenis bahan, yaitu OPF dan PKS dapat dilihat pada Gambar 3. Kadar air awal pada kedua jenis biomassa ini cukup tinggi, yaitu 15% untuk OPF dan 12,67% untuk PKS, yang menunjukkan bahwa sebelum proses pengarangan biomassa memiliki kandungan air yang cukup besar. Ketika suhu pengarangan ditingkatkan ke 300 °C, terjadi penurunan kadar air yang cukup signifikan pada kedua bahan. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu 300 °C, proses pengarangan mulai efektif dalam menguapkan kandungan air dalam biomassa dan terus berkurang pada suhu yang lebih tinggi, meskipun dampak pengurangan kadar air semakin kecil seiring dengan kenaikan suhu pengarangan. Sehingga suhu pengarangan paling efektif jika ditinjau dari kadar air adalah 600 °C.

Dapat dilihat dari Gambar 2, proses pengarangan mulai efektif pada suhu 300°C, biomassa mulai menghitam karena terbentuknya karbon padat. Pada tahap ini, komponen organik terurai dan sebagian besar material volatil menguap. Hasilnya adalah arang atau karbon yang lebih stabil dengan kadar air yang sudah sesuai SNI. Reaksi ini menghasilkan produk padat berkarbon tinggi yang berguna sebagai bahan bakar (Simanjuntak et al., 2024).

Pengaruh Suhu Pengarangan terhadap Kadar Abu

Kadar abu merupakan residu anorganik yang tersisa setelah proses pembakaran biomassa selesai. Selama pembakaran, senyawa organik terurai seiring dengan meningkatnya suhu, meninggalkan abu yang mengandung berbagai mineral (Albary, 2022). Hubungan antara suhu yang digunakan dalam proses pengarangan terhadap kadar abu yang dihasilkan dari dua jenis biomassa, yaitu OPF dan PKS ditunjukkan oleh Gambar 4. Kadar abu meningkat secara bertahap seiring dengan kenaikan suhu pengarangan. Kadar abu pada OPF tercatat lebih tinggi dibandingkan dengan PKS pada setiap tingkat suhu. Saat suhu pengarangan mencapai 300°C, kadar abu pada OPF dan PKS menunjukkan peningkatan, dengan OPF tetap memiliki kadar abu yang lebih tinggi daripada PKS. Pola peningkatan ini konsisten pada suhu 400, 500, hingga 600°C, kadar abu terus bertambah seiring dengan naiknya suhu pengarangan. Pada suhu 600°C, kadar abu OPF mencapai nilai tertinggi, yaitu 7,68%, kadar abu PKS juga meningkat menjadi 5,76%, meskipun tetap lebih rendah dibandingkan OPF.



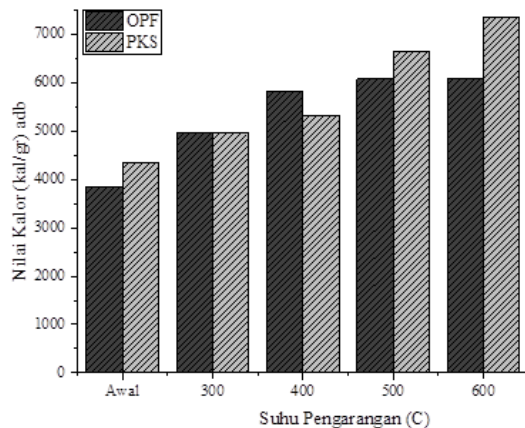
Gambar 4. Pengaruh Suhu Pengarangan terhadap Kadar Abu Biomassa

Hal ini disebabkan OPF memiliki struktur yang lebih kompleks dengan kandungan serat dan bahan organik yang beragam, termasuk lignin, selulosa, dan hemiselulosa (Istiqomah & Kusumawati, 2022; Novra, 2013). Hemiselulosa memiliki struktur yang kurang stabil secara termal dibandingkan lignin dan selulosa, sehingga terdekomposisi lebih cepat pada suhu rendah, menghasilkan residu anorganik yang lebih tinggi. Selulosa yang lebih stabil dari hemiselulosa, akan terurai pada suhu menengah, menyumbang residu padat. Sementara itu, lignin memiliki struktur aromatik yang lebih kompleks dan tahan panas, sehingga menghasilkan residu karbon yang signifikan selama dekomposisi (Setiawan & Riskina, 2022). Kandungan lignin pada OPF yang relatif rendah dibandingkan PKS, ditambah tingginya hemiselulosa, menghasilkan lebih banyak residu anorganik yang berkontribusi pada kadar abu yang tinggi (Prasetyo, 2023).

Sedangkan, PKS lebih sederhana secara struktur dan komposisinya didominasi oleh lignin, lebih efisien dan menghasilkan abu lebih sedikit (Aditya et al., 2022). Kandungan lignin yang jauh lebih tinggi memberikan stabilitas struktural yang lebih baik dan menghasilkan residu padat yang lebih sedikit. Lignin yang lebih dominan menghasilkan karbon tetap yang lebih tinggi, tanpa menghasilkan kadar abu sebanyak hemiselulosa. Selain itu, hemiselulosa dan selulosa yang lebih rendah pada PKS juga mengurangi produksi residu anorganik selama dekomposisi. Oleh karena itu, ketika dibakar, PKS menghasilkan lebih sedikit residu abu dibandingkan OPF.

Pengaruh Suhu Pengarangan terhadap Nilai Kalor

Nilai kalor adalah jumlah energi panas yang dihasilkan oleh suatu bahan bakar saat dibakar (Kusman et al., 2024). Kadar air dan kadar abu memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai kalor arang biomassa (Ardiansyah et al., 2022). Hubungan antara suhu pengarangan dengan nilai kalor dari dua jenis biomassa, yaitu OPF dan PKS ditunjukkan oleh Gambar 5.

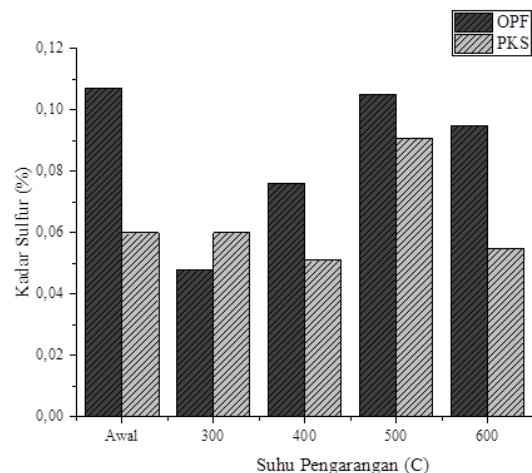


Gambar 5. Pengaruh Suhu Pengarangan terhadap Nilai Kalor Biomassa

Secara umum, baik OPF maupun PKS menunjukkan peningkatan nilai kalor seiring dengan kenaikan suhu pengarangan. Pada Gambar 5 terlihat perbandingan yang signifikan nilai kalor biomassa awal dengan nilai kalor biomassa hasil pengarangan dengan suhu 600 °C. Nilai kalori OPF dan PKS pada suhu 600 °C mencapai 6095,35 kal/kg dan 7364,81 kal/kg. Hal ini menunjukkan semakin tinggi suhu yang digunakan dalam proses pengarangan, maka arang yang dihasilkan akan memiliki potensi menghasilkan panas yang lebih besar, saat dibakar. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi suhu pengarangan, semakin banyak komponen volatil (seperti air, gas) yang menguap dari biomassa. Hal ini menyebabkan konsentrasi karbon tetap (*fixed carbon*) dalam arang meningkat, sehingga meningkatkan kemampuan arang untuk menghasilkan panas saat dibakar (Afrianah et al., 2022; Ardiansyah et al., 2022; Faizal et al., 2015). Perbedaan nilai kalor antara OPF dan PKS dipengaruhi oleh komposisi kimia awal dari kedua biomassa tersebut. OPF umumnya mengandung lebih banyak lignin dan selulosa yang dapat menghasilkan arang dengan nilai kalor yang lebih tinggi, namun juga memiliki kadar abu yang lebih tinggi yang dapat

menurunkan nilai kalor (Haryanti et al., 2014; Rahardja et al., 2022).

Lignin adalah polimer kompleks yang kaya akan struktur aromatik, lebih tahan panas dibandingkan hemiselulosa dan selulosa. Selama proses pengarangan, sifat tahan panas lignin memungkinkan dekomposisi termal yang lebih lambat, menghasilkan pelepasan energi yang lebih besar, yang secara langsung berkontribusi pada nilai kalor yang lebih tinggi (Erfani Jazi et al., 2019). Namun, lignin juga mengandung lebih banyak elemen anorganik (seperti kalium, kalsium, dan magnesium) dibandingkan selulosa dan hemiselulosa. Elemen-elemen ini tidak terdekomposisi selama proses termal dan justru membentuk residu padat yang menyumbang pada peningkatan kadar abu. Hal tersebut menyebabkan lignin yang lebih tinggi pada PKS menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi, tetapi juga menyebabkan pembentukan abu yang lebih banyak dibandingkan dengan biomassa yang lebih kaya hemiselulosa atau selulosa (Shobib et al., 2023).



Gambar 6. Pengaruh Suhu Pengarangan terhadap Kadar Sulfur Biomassa

Pengaruh Suhu Pengarangan terhadap Kadar Sulfur

Sulfur pada biomassa merujuk pada kandungan unsur sulfur yang terdapat dalam bahan biomassa, yang dapat berasal dari berbagai sumber organik (Pertiwiningrum et al., 2023). Kadar sulfur dalam biomassa penting untuk dipertimbangkan, karena dapat mempengaruhi kualitas bahan bakar dan emisi yang dihasilkan saat biomassa dibakar atau diproses lebih lanjut. Umumnya, kandungan sulfur dalam biomassa lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil seperti batu bara. Namun, kadar sulfur dapat

bervariasi tergantung jenis biomassa dan kondisi lingkungannya (Tumpu et al., 2022). Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa PKS dan OPF memiliki kadar sulfur awal yang berbeda, yaitu 0,06 % untuk PKS dan 0,11 % untuk OPF. Peningkatan suhu dari 300 hingga 600°C telah menunjukkan bahwa pola perubahan kadar sulfur yang berbeda pada masing-masing material yang sama-sama berasal dari kelapa sawit.

Berdasarkan Gambar 6 terlihat bahwa kadar sulfur cenderung berubah seiring dengan peningkatan suhu. Pada suhu awal, kadar sulfur pada OPF lebih tinggi dibandingkan PKS. Namun, pada rentang suhu 300 hingga 600°C, kadar sulfur pada kedua jenis biomassa mengalami fluktuasi, dengan OPF umumnya memiliki kadar sulfur yang lebih tinggi dibandingkan PKS di setiap tahap. Selama proses pengarangan, kadar sulfur menunjukkan pola penurunan, peningkatan, dan dekomposisi yang bergantung pada suhu. Peningkatan kadar sulfur ini dapat disebabkan oleh re-adsorpsi gas volatil sulfur (seperti H₂S atau SO₂) pada permukaan karbon aktif yang terbentuk selama pengarangan, atau oleh reaksi sulfur volatil dengan mineral abu dalam biomassa, menghasilkan senyawa sulfur anorganik seperti sulfat (CaSO₄ dan MgSO₄). Fluktuasi ini menunjukkan adanya redistribusi sulfur dalam biomassa, sulfur yang terlepas sebelumnya berinteraksi kembali dengan karbon aktif atau mineral dalam biomassa (Knudsen et al., 2004; Knudsen et al., 2004). Penurunan kadar sulfur pada kedua jenis biomassa, dengan PKS menunjukkan penurunan yang lebih signifikan dibandingkan OPF, disebabkan oleh dekomposisi total senyawa sulfur, baik yang bersifat organik maupun anorganik, menjadi gas volatil seperti SO₂. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu tinggi, hampir semua sulfur dalam biomassa dilepaskan, sehingga residunya memiliki kadar sulfur yang sangat rendah (Han et al., 2019).

Perbedaan karakteristik kadar sulfur pada OPF dan PKS terlihat jelas selama proses pemanasan, yang dipengaruhi oleh komposisi bahan organik dan anorganik masing-masing. Pada OPF, kadar sulfur awalnya lebih tinggi, yaitu 0,11%, dan mengalami fluktuasi bertahap dengan kenaikan suhu. Kadar sulfur pada suhu 300°C sedikit menurun, namun meningkat kembali pada suhu 400 dan 500°C, dan hampir mencapai nilai awal pada suhu 600°C. Peningkatan bertahap ini mengindikasikan bahwa senyawa sulfur dalam OPF lebih stabil pada suhu tinggi, atau terbentuk senyawa sulfur baru selama dekomposisi bahan organik yang kompleks. Hal ini dikarenakan OPF

mengandung lebih banyak senyawa organik yang mudah terurai dan terpecah selama pembakaran, seperti dalam struktur molekul organik yang kompleks (Alfakihuddin et al., 2023; Sopiah, 2005). Sebaliknya, pada PKS, kadar sulfur awalnya lebih rendah (0,06%) dan menunjukkan fluktuasi yang lebih signifikan. Meskipun kadar sulfur tetap pada suhu 300°C, menurun pada suhu 400°C, dan meningkat pada suhu 500°C, sebelum turun lagi pada 600°C. Pola fluktuasi ini menunjukkan ketidakstabilan sulfur dalam PKS seiring dengan kenaikan suhu. PKS memiliki lebih sedikit senyawa organik yang mengandung sulfur karena strukturnya yang lebih padat dan bersifat anorganik, dengan mayoritas sulfur terikat dalam struktur lignin dan selulosa yang lebih stabil. Cangkang kelapa sawit yang lebih sulit terbakar sepenuhnya menyebabkan pelepasan sulfur yang lebih sedikit, berbeda dengan OPF yang lebih mudah terbakar. Selain itu, pada PKS, peningkatan suhu tidak selalu menghasilkan penurunan kadar sulfur yang konsisten, karena struktur anorganik yang lebih kaku membuatnya lebih tahan terhadap proses pembakaran sempurna. Dengan demikian, perbedaan utama antara OPF dan PKS terletak pada komposisi bahan pembentuknya—OPF yang lebih banyak mengandung senyawa organik yang mudah terurai dan mengandung lebih banyak sulfur, serta lebih mudah terbakar, sedangkan PKS lebih padat, bersifat anorganik, dan mengandung lebih sedikit senyawa sulfur yang mudah terurai (Kuswa et al., 2024).

Perbandingan Arang Biomassa terhadap Batubara

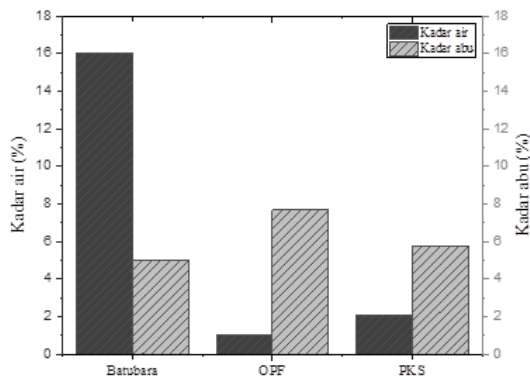
Berdasarkan hasil analisis pengaruh suhu pengarangan terhadap kadar air, kadar abu, nilai kalor, dan kadar sulfur, dapat disimpulkan bahwa suhu pengarangan terbaik adalah 600 °C. Hal ini dikarenakan nilai kalor yang paling tinggi diperoleh pada suhu tersebut. Dalam penelitian ini, membandingkan data hasil pengarangan tersebut dengan batubara, untuk menunjukkan bahwa biomassa hasil *treatment* tersebut memiliki kualitas yang sebanding bahkan lebih dari *low rank coal* tersebut. Berikut hasil perbandingannya:

Perbandingan Kadar Air dan Kadar Abu Batubara terhadap Biomassa Hasil Pengarangan

Perbandingan kadar air dan kadar abu batubara terhadap biomassa hasil pengarangan ditunjukkan pada Gambar 7 yang memperlihatkan

bahwa batubara memiliki kadar air yang lebih tinggi dibandingkan dengan biomassa (OPF dan PKS) yaitu 16,03% batubara, 1,00% OPF dan 2,08% PKS.

Berdasarkan Gambar 7, kadar air biomassa (PKS dan OPF) lebih rendah dibandingkan batubara. Kandungan air yang tinggi pada batubara akan menyerap sebagian panas yang seharusnya digunakan untuk pembakaran, sehingga mengurangi nilai kalornya (Istomo & Tristiasti, 2017). Sebaliknya, biomassa yang telah melalui proses pengeringan memiliki kadar air yang lebih rendah, sehingga lebih efisien dalam pembakaran. Kadar air yang optimal pada bahan bakar akan memaksimalkan proses pembakaran, mengurangi emisi gas buang, dan meningkatkan efisiensi produksi energi (Sutarto et al., 2020).



Gambar 7. Perbandingan Kadar Air dan Kadar Abu Batubara dengan Biomassa Hasil Pengarangan

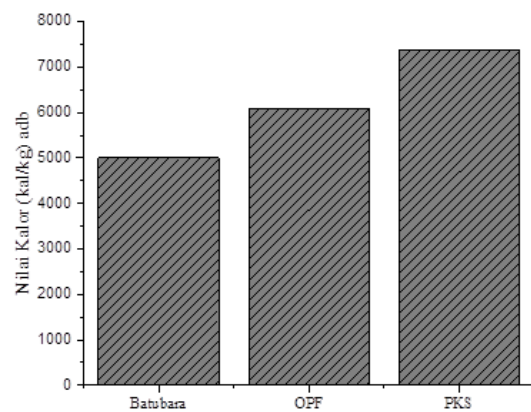
Dari aspek kadar abu, OPF memiliki kadar abu tertinggi diantara ketiga bahan ini, diikuti oleh PKS dan batubara. Batubara memiliki kadar abu paling rendah dibandingkan dua bahan lainnya, meskipun kadar airnya lebih tinggi. Perbedaan kadar abu ini menunjukkan bahwa masing-masing bahan memiliki komposisi residu yang berbeda saat terbakar, OPF menghasilkan lebih banyak residu abu dibandingkan dengan batubara dan PKS. Pelepah kelapa sawit mengandung lebih banyak senyawa organik dan mineral dibandingkan dengan batubara dan cangkang kelapa sawit (Sukma & Fadli, 2023).

Perbandingan Nilai Kalor Batubara terhadap Biomassa Hasil Pengarangan

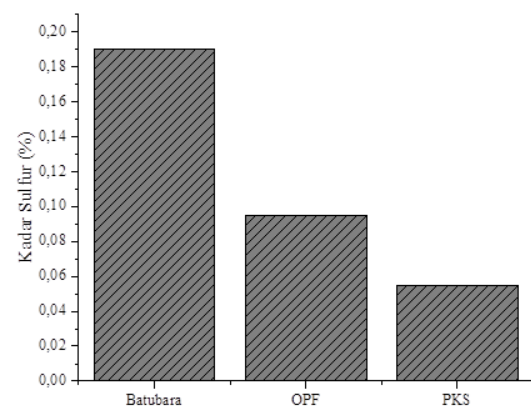
Perbandingan nilai kalor batubara terhadap biomassa hasil pengarangan ditunjukkan pada Gambar 8. Nilai kalor biomassa (OPF dan PKS) lebih tinggi dibandingkan dengan batubara. Nilai kalor batubara adalah 5013,22 kal/g adb,

sedangkan nilai kalor arang biomassa (OPF dan PKS) berturut-turut adalah 6095,35 kal/g adb dan 7364,81 kal/g adb. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengarangan biomassa berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai kalornya. Salah satu faktor yang mempengaruhi hal ini adalah kadar air dan kadar abu, yang dapat dilihat pada Gambar 7. Semakin rendah kadar air suatu bahan bakar, semakin efektif pula proses pembakarannya karena sedikit energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air (Heru et al., 2024).

Kadar air yang relatif rendah pada arang OPF dan PKS akan menghasilkan pembakaran lebih optimal dan produksi energi panas yang lebih tinggi. Namun, kadar abu yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor karena masih terdapat residu non-karbon yang tidak terbakar sempurna (Pradipta et al., 2023). Hal ini dapat terlihat pada nilai kalor OPF, di mana meskipun OPF memiliki kadar air terendah dibandingkan dengan batubara dan PKS, kadar abunya yang lebih tinggi memengaruhi nilai kalornya.



Gambar. 1 Perbandingan Nilai Kalor Batubara terhadap Biomassa Hasil Pengarangan



Gambar. 2 Perbandingan Kadar Sulfur Batubara dengan Biomassa Hasil Pengarangan

Perbandingan Kadar Sulfur Batubara dengan Biomassa Hasil Pengarangan

Perbandingan kadar sulfur batubara terhadap biomassa ditunjukkan pada Gambar 9, diketahui bahwa batubara masih memiliki kadar sulfur yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan OPF dan PKS pengarangan. Batubara mengandung berbagai bentuk sulfur, termasuk sulfur piritik, sulfur organik, dan sulfur sulfat. Sulfur piritik, yang berbentuk mineral (FeS_2), adalah komponen yang signifikan dalam batubara dan sulit untuk dihilangkan (Mawardi & Widodo, 2023).

Selain itu, batu bara juga mengandung sulfur organik dalam jumlah tinggi yang terperangkap dalam struktur molekul organik (Yuwanto et al., 2024). Kandungan sulfur yang tinggi dalam batubara ini berkontribusi terhadap emisi sulfur oksida (SO_x) saat dibakar. SO_x merupakan salah satu penyebab utama hujan asam dan polusi udara (Sibirian & Mar, 2020). Sedangkan, kadar sulfur yang rendah pada biomassa ini dikarenakan OPF dan PKS telah melalui proses pengarangan yang menghilangkan sebagian besar unsur sulfur dan menghasilkan produk akhir yang lebih bersih, sehingga arang biomassa ini menawarkan alternatif yang lebih bersih dari segi kandungan sulfur dibandingkan dengan batubara.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengarangan dari 300 hingga 600 °C menurunkan kadar air dan meningkatkan kadar abu pada kedua jenis biomassa. Nilai kalor arang meningkat signifikan pada suhu pengarangan yang lebih tinggi, mencapai 6095,35 kal/kg untuk pelepeh dan 7364,81 kal/kg untuk cangkang pada suhu 600 °C. Sementara itu, kadar sulfur pada kedua biomassa menunjukkan pola yang bervariasi, dengan pelepeh lebih stabil di suhu tinggi dibandingkan cangkang. Suhu pengarangan 600 °C ditemukan sebagai suhu optimal untuk mendapatkan kualitas arang yang tinggi. Hasil membandingkan batubara dengan arang biomassa juga menunjukkan bahwa biomassa hasil pengারণan ini berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk *co-firing* dengan batubara berperingkat rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT. Sriwijaya Bara Logistick dan PT. Triaryani atas dukungan yang diberikan berupa penyediaan sampel batubara untuk keperluan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, I. A., Haryadi, F. N., & Haryani, I. (2022). Analisis pengujian *co-firing* biomassa cangkang kelapa sawit pada PLTU *Circulating Fluidized Bed* (CFB) sebagai upaya bauran energi terbarukan. *Rotasi*, 24(2), 61–66.
- Afriana, N., Ruslan, R., Suryadi, H. R., Amir, I., & Irsyad, A. (2022). Pengaruh temperatur karbonisasi terhadap karakteristik briket berbasis arang sekam padi dan tempurung kelapa. *Jft: Jurnal Fisika dan Terapannya*, 9(2), 138–147.
- Albary, E. (2022). Karakteristik arang dari pirolisis limbah jagung (*Skripsi*). Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Alfakihuddin, M. L. B., Sunartaty, R., Satriawan, D., Purnomo, T., Sahabuddin, E. S., Darsini, O. S. R., Dewadi, F. M., Ningsih, E., bani, G. A., & Hutauruk, T. R. (2023). Pengendalian limbah industri. *PT Global Eksekutif Teknologi*. Cetakan Pertama, Maret, 110–111.
- Ardiansyah, I., Putra, A. Y., & Sari, Y. (2022). Analisis nilai kalor berbagai jenis briket biomassa secara kalorimetri. *Journal Of Research And Education Chemistry*, 4(2), 120.
- Ariwidyanata, R., Wibisono, Y., & Ahmad, A. M. (2019). Karakteristik fisik briket dari campuran serbuk teh dan serbuk kayu trembesi (*Samanea saman*) dengan perekat tepung tapioka. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, 7(3), 245–252.
- Erfani Jazi, M., Narayanan, G., Aghabozorgi, F., Farajidizaji, B., Aghaei, A., Kamyabi, M. A., Navarathna, C. M., & Mlsna, T. E. (2019). Structure, chemistry and physicochemistry of lignin for material functionalization. *Sn Applied Sciences*, 1, 1–19.
- Faizal, M., Saputra, M., & Zainal, F. A. (2015). Pembuatan briket bioarang dari campuran

- batubara dan biomassa sekam padi dan eceng gondok. *Jurnal Teknik Kimia*, 21(4), 28–39.
- Fauzun, H., Nurdin, H., Lapisa, R., & Primandari, S. R. P. (2024). Studi nilai kalor briket cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar padat. *Jurnal Vokasi Mekanika*, 6(3), 297–302.
- Febriani, A. V., Hanum, F. F., & Rahayu, A. (2024a). Analisis potensi dan tantangan biomassa sebagai bahan bakar pada PLTU dan PLTBM. *Prosiding Semnastek*.
- Febriani, A. V., Hanum, F. F., & Rahayu, A. (2024b). Analisis potensi dan tantangan biomassa sebagai bahan bakar pada PLTU dan PLTBM. *Prosiding Semnastek*.
- Han, K., Gao, J., & Qi, J. (2019). The study of sulphur retention characteristics of biomass briquettes during combustion. *Energy*, 186, 115788.
- Hapsauqi, I., Desfitri, E. R., Hanum, F. F., & Setyawan, M. (2024). Development of *Aloe vera*-based desulfurization method to improve the quality of sumatra's coal. *Jurnal Sains Natural*, 14(2), 73–80.
- Harmiansyah, H., Dari, P. W., Wahyuni, S., Rahmawati, S. D., Wati, N. M. T., & Putri, A. K. (2023). Karakteristik arang dari cangkang kelapa sawit sebagai bahan dasar utama pembuatan biobriket. *Sultra Journal Of Mechanical Engineering*, 2(1), 29–36.
- Haryanti, A., Norsamsi, N., Sholiha, P. S. F., & Putri, N. P. (2014). Studi pemanfaatan limbah padat kelapa sawit. *Konversi*, 3(2), 20–29.
- Hasanah, M. (2021). Pengaruh suhu aktivasi terhadap karakteristik dan mikrostruktur karbon aktif pelepah kelapa sawit (*Elaeis guinensis*). *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, 16, 1–9.
- Heru, S., Jahiding, M., & Ilmawati, W. O. S. (2024). Produksi dan karakterisasi bio-coke berbasis limbah kulit buah jarak pagar (*Jatropha curcas l.*) sebagai bahan bakar alternatif menggunakan metode pirolisis. *Jurnal Aplikasi Fisika*, 20(01), 21–29.
- Irbah, Y. N., Nufus, T. H., & Hidayati, N. (2022). Analisis nilai kalori dan laju pembakaran briket campuran cangkang nyamplung dan tempurung kelapa. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*, 1, 689–694.
- Istiqomah, I., & Kusumawati, D. E. (2022). *Buku Ajar Pertanian Terpadu Berbasis Bebas Limbah*. Duta Media Publishing.
- Istomo, F. P., & Tristiasti, A. (2017). Penetapan nilai kalori dalam batubara dengan kalorimeter parr 6200. *Jurnal Sains Natural*, 7(2), 83–90.
- Knudsen, J. N., Jensen, P. A., & Dam-Johansen, K. (2004). Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass. *Energy & Fuels*, 18(5), 1385–1399.
- Knudsen, J. N., Jensen, P. A., Lin, W., Frandsen, F. J., & Dam-Johansen, K. (2004). Sulfur transformations during thermal conversion of herbaceous biomass. *Energy & Fuels*, 18(3), 810–819.
- Kurniawan, E., Muarif, A., & Siregar, K. A. (2022). Pemanfaatan sekam padi dan cangkang sawit sebagai bahan baku briket arang dengan menggunakan perekat tepung kanji. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian Lppm Umj*, 1(1).
- Kusman, M. R., Faruk, F., & Sibua, S. (2024). Penggunaan eceng gondok (*Eichhorina crassipes*) sebagai bahan bakar alternatif biobriket di danau Galela. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(4).
- Kuswa, F. M., Putra, H. P., Prabowo, Darmawan, A., Aziz, M., & Hariana, H. (2024). Investigation of the combustion and ash deposition characteristics of oil palm waste biomasses. *Biomass Conversion And Biorefinery*, 14(19), 24375–24395.
- M Yuda Prasetyo, N. (2023). Studi eksperimental torefaksi pelepah sawit untuk mendapatkan karakteristik bahan bakar padat dengan variasi temperatur (*Skripsi*). Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Mawardi, F., & Widodo, S. (2023). Analisis pengaruh ukuran butir terhadap desulfurisasi dan deashing batubara menggunakan larutan NaOH. *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, 15–26.
- Muarif, A., Nurhabiah, N., Muhammad, M., Hakim, L., Ginting, Z., & Mulyawan, R. (2024). Pengaruh variasi jenis dan volume perekat (tepung tapioka dan air tebu) terhadap kualitas briket dari pelepah kelapa

- sawit (*Elaeis guenensis jacq*). *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 9(2), 136–143.
- Novra, A. (2013). Prospek, tantangan dan pengembangan sistem integrasi sapi di lahan perkebunan kelapa sawit di provinsi Jambi. *Universitas Jambi*
- Paranita, D. (2020). Kombinasi campuran pelepah kelapa sawit dan kulit kacang tanah sebagai bahan baku pembuatan biobriket. *Jurnal Al Ulum Lppm Universitas Al Washliyah Medan*, 8(2), 45–53.
- Pertiwiningrum, A., Budiarto, R., & Widhyharto, D. S. (2023). *Biogas untuk kemandirian energi di perdesaan*. Ugm Press.
- Pradipta, N. N., Prakosa, G. G., Masykurrahmat, F. H., & Basuseno, G. D. (2023). Pembuatan karbon aktif dan biopelet dari bambu lokal Malang. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 41(1), 35–44.
- Purwaningsih, P., Saragih, E. W., & Santoso, B. (2024). Diseminasi pemanfaatan limbah pelepah kelapa sawit dan kotoran sapi menjadi briket arang sebagai bahan bakar alternatif di Kampung Majemus Distrik Masni Kabupaten Manokwari. *Jurnal Abdinus: Jurnal Pengabdian Nusantara*, 8(1), 172–183.
- Rahardja, I. B., Hasibuan, C. E., & Dermawan, Y. (2022). Analisis briket fiber mesocarp kelapa sawit metode karbonisasi dengan perekat tepung tapioka. *Sintek Jurnal: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 16(2), 82–91.
- Ridaldy, E., Yulia, A., & Lisani, L. (2021). Pengaruh pencampuran pelepah sawit (*Elaeis guineensis jacq*) dengan tempurung kelapa (*Cocos nucifera*) terhadap mutu biobriket., 1–7.
- Ruing, A. P. T., & Sulaiman, D. (2022). Analisis karakteristik briket berbahan cangkang kelapa sawit dan sekam padi menggunakan perekat tapioka. *Jurnal Sains Benuanta*, 1(1), 15–24.
- Saidal Siburian, M. M., & Mar, M. (2020). *Pencemaran Udara Dan Emisi Gas Rumah Kaca*. Kreasi Cendekia Pustaka.
- Setiawan, A., & Riskina, S. (2022). *Teknologi Konversi Biomassa Secara Termokimia: Pirolisis*. Syiah Kuala University Press.
- Shobib, A., Da Silva, T., Pramudono, B., Rokhati, N., & Kasmiyatun, M. (2023). Analisis komposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam berbagai jenis kayu: metode chesson-datta. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 8(4), 318–323.
- Simanjuntak, J. P., Silaban, R., & Putra, A. N. (2024). *Teknologi Pirolisis Biomassa Energi Terbarukan*. Echa Progres: Lembaga Pengembangan Profesionalism Sdm.
- Sopiah, N. (2005). Transformasi kimia senyawa belerang, dampak, dan penanganannya. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 6(1).
- Standar Operasional Prosedur Mitigasi Gas Rumah Kaca (GRK)*. (2019). *Standar Operasional Prosedur Mitigasi Gas Rumah Kaca*. Tuna Sawa Erma.
- Sukma, A. A. S., & Fadli, A. (2023). Analisa spesifikasi fluff, pellet, dan bricket pelepah kelapa sawit sebagai biomassa co-firing untuk pembangkit listrik. *Journal Of Bioprocess, Chemical And Environmental Engineering Science*, 4(1), 7–18.
- Sutarto, H., Nurrohim, T. G., Ilyas, A. X., & Suyitno, S. (2020). Pembakaran bersama biomassa dan batu bara: pengaruh rasio biomassa-batu bara dan excess air. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, 19(1), 29–34.
- Tampubolon, J. M., Saron, S., & Analianasari, A. (2024). Pemanfaatan limbah tanam jamur merang bermedia tandan kosong kelapa sawit dan pelepah sawit sebagai briket energi terbarukan. *Prosiding Seminar Nasional Pembangunan Dan Pendidikan Vokasi Pertanian*, 5(1), 928–933.
- Tumpu, M., Lapian, F. E. P., Pasanda, O. S. R., Muliawan, I. W., Indrayani, P., & Yasa, I. G. M. (2022). *Energi Hijau*. Tohar Media.
- Yuwanto, S. H., Syah, A., & Bahar, H. (2024). Analisis proksimat untuk menentukan jenis dan kualitas batubara daerah Montallat, Barito, Kalimantan Tengah. *Prosiding Senastitan: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan*, 4.
- Zhang, X. Y., Wang, R. Y., Ma, F. Y., Wei, X. Y., & Fan, X. (2020). Structural characteristics of soluble organic matter in four low-rank coals. *Fuel*, 267.

<https://doi.org/10.1016/J.Fuel.2020.117230>

Zidhan, M., Legawati, L., & Arnel, A. H. (2023). Optimalisasi potensi desa, pengolahan limbah perkebunan sawit menjadi briket sebagai energi alternatif yang bernilai ekonomi tinggi. *Jurnal Pengabdian Untukmu Negeri*, 7(2), 274–277.