

Analisa Spesifikasi *Fluff*, *Pellet*, dan *Bricket* Pelelepah Kelapa Sawit sebagai Biomassa *Co-firing* untuk Pembangkit Listrik

Ari Aditia Sukma^{1,2*}, Padil², Ahmad Fadli²

¹Program Studi Teknik Kimia Bahan Nabati, Politeknik ATI Padang, Padang 25171, Indonesia

²Program Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28291, Indonesia

ARTICLE HISTORY

Received : 15 Januari 2023

Revised : 10 Februari 2023

Accepted : 17 Maret 2023

KEYWORDS

co-firing

fluff

slagging

fouling

*correspondence author:

Email: ariaditiasukma121@gmail.com



ABSTRACT

The abundance of palm frond waste in Indonesia makes it an ideal source as co-firing material to increase renewable energy consumption. Therefore, it is necessary to determine whether oil palm fronds in the form of fluff, pellets, and bricks can be used as co-firing fuel. This study also aims to see whether there are differences in the potential of hard and soft palm fronds as solid fuel for power plants, as well as to calculate its slagging and fouling risk. Palm fronds was dried and reduced in sized using a wood chipper then sifted with a 20 mesh sieve to obtain palm frond fluff, then the fluff was mixed with 22% tapioca adhesive (weight ratio of 20% of the biomass) to be molded into pellet. Meanwhile, wood bricks was prepared by pyrolyzing the hard fronds ($T = 550^{\circ}\text{C}$, $t = 5 \text{ min}$) and mixing the charcoal obtained with 22% tapioca adhesive (weight ratio of 30% of the biomass). From the results of the analysis carried out, it is known that palm frond brick provides the best results with an NCV value of 7095 cal/g. On the other side, both hard frond fluff and soft frond fluff contains the same sulfur content (0.06%), thus the difference in using hard or soft fronds as co-firing fuel does not have much effect. Furthermore, based on the analysis of potential slagging and fouling, all types of oil palm frond samples studied are shown to have a low to medium risk level.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan ketersediaan biomassa yang melimpah dan beragam. Kelimpahan tersebut dapat memberikan keuntungan apabila biomassa dikelola secara optimal untuk menghasilkan manfaat. Di Provinsi Riau khususnya, jenis biomassa yang banyak ditemukan merupakan biomassa berbasis sawit, yang salah satunya adalah pelepah kelapa sawit (*oil palm fronds*/OPF). Zahari dkk (2012) menerangkan bahwa di Indonesia hasil pelepah sawit per tahun mencapai 0,62 ton/ha dan kebanyakan dari pelepah tersebut hanya dibiarkan di area perkebunan untuk konservasi tanah serta kontrol erosi. Sementara itu, berdasarkan data BPS tahun 2021, terdapat 14,7 juta hektar lahan perkebunan sawit di Indonesia sehingga berat kering pelepah sawit yang dihasilkan setiap tahun dapat mencapai 9 juta ton. Hal ini menimbulkan gagasan untuk memanfaatkan biomassa pelepah sawit secara lebih optimal, salah satunya dengan menjadi bahan bakar *co-firing*.

Co-firing adalah penggunaan dua bahan bakar secara bersamaan dalam satu tungku boiler (Koppejan dan Loo, 2008). Teknik ini menguntungkan karena dapat menggunakan pembangkit yang sudah ada (*zero investment*), bisa dilakukan di semua tipe boiler, memiliki stabilitas pembakaran yang lebih tinggi, emisi hasil pembakaran lebih rendah, dan biaya produksi relatif lebih murah dibandingkan pembakaran batubara murni (Duan dkk, 2015). Pemanfaatan biomassa sebagai *co-firing* juga dapat membantu capaian target bauran energi

baru dan terbarukan. Meski suplai dan harga biomassa yang tidak stabil kerap kali menjadi tantangan bagi *co-firing*, namun ketersediaan limbah pelepah kelapa sawit yang melimpah di Indonesia diduga tidak akan menimbulkan kendala. Selain itu, menurut Sulaiman dkk (2015), pelepah sawit hanya mengandung abu dalam persentase yang kecil (6%), sehingga cocok dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat dalam *co-firing*.

Terdapat tiga jenis ukuran biomassa untuk bahan bakar *co-firing*: *fluff*, *pellet*, dan *bricket*. Yudhistira dkk (2017) pada penelitiannya telah mengujikan pembuatan briket dari pelepah sawit dengan variasi tekanan serta penambahan perekat tapioka. Pelepah sawit ditorefikasi pada temperatur 300°C selama 2 jam, dan nilai kalor tertinggi sebesar 5144,94 kal/g diperoleh pada komposisi perekat tapioka 30% dan tekanan kempa 100 bar serta ukuran partikel bahan baku <20 *mesh*. Seiring itu, karbonisasi pelepah sawit pada variasi suhu 450, 500, dan 550°C menunjukkan bahwa kenaikan nilai kalor berbanding lurus dengan kenaikan suhu pembakaran, dengan variasi 550°C memiliki nilai kalor terbesar senilai 6785,84 kal/g (Qurotullaili dkk, 2017). Di sisi lain, *pellet* biomassa dari campuran pelepah kelapa sawit dan getah pohon pulai yang diteliti Sunaryo dkk (2018) memiliki nilai kalor rata-rata sebesar 5452,6 kal/g. Temuan-temuan tersebut menjadi dasar untuk dilakukannya pengamatan lebih lanjut terhadap pengaruh bentuk bahan bakar terhadap performanya.

Penelitian mengenai pengaruh ukuran *co-firing* dan kekerasan pelepah sawit terhadap parameter-parameternya sebagai bahan bakar belum pernah dilakukan. Oleh karenanya, penelitian ini bertujuan untuk melihat potensi limbah pelepah kelapa sawit sebagai bahan bakar *co-firing* dalam bentuk *fluff*, *pellet*, dan *bricket*. Selain itu, perbedaan karakteristik bahan bakar yang terbuat dari bagian pelepah lunak dan keras juga akan diteliti, karena pelepah sawit yang memiliki bagian pangkal dan ujung dengan kekerasan berbeda diduga akan menghasilkan nilai kalor yang berbeda pula. Terakhir, potensi *slagging* dan *fouling* juga ditentukan untuk melihat kelayakan biomassa sebagai bahan bakar padat.

2. METODE

2.1 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *wood chipper*, timbangan analitik digital, reaktor pirolisis, gas nitrogen, lumpang porselen diameter 10 cm, alu, ayakan *mesh* no. 20, cetakan *bricket*, cetakan *pellet*, dan oven pengering universal. Sementara itu, bahan-bahan yang digunakan antara lain pelepah kelapa sawit dewasa (usia >8 tahun), tepung tapioka, dan air.

2.1 Prosedur Penelitian

2.1.1 Preparasi *Fluff*

Teknik preparasi *fluff* dari pelepah kelapa sawit mengacu kepada penelitian Dey dkk (2016). Pelepah sawit dewasa dibersihkan lalu dibagi dua berdasarkan bagian keras (0-4 meter dari pangkal pelepah) dan bagian lunak (4-8 meter dari pangkal pelepah), lalu dicacah hingga berukuran ± 30 cm dan kemudian dijemur selama 3 hari. Setelahnya, pelepah dikeringkan lebih lanjut selama 15 menit (65°C). Potong-potongan pelepah kering kemudian diproses menggunakan *wood chipper* sehingga membentuk *fluff* yang selanjutnya diayak menggunakan ayakan 20 *mesh*. *Fluff* dikeringkan selama tiga jam lalu disimpan rapat.

2.1.2 Pembuatan Pellet

Fluff pelepah keras yang sudah dipreparasi sebelumnya dapat diproses lebih lanjut untuk menghasilkan *pellet*. Berdasarkan riset oleh Retno dkk (2017), larutan perekat yang digunakan pada *pellet* dapat dibuat dari tepung tapioka dengan komposisi 22% terhadap air. Larutan perekat kemudian dicampur dengan *fluff* yang sudah diayak dalam rasio 20% dari berat biomassa. Setelahnya, *pellet* dicetak dan dikeringkan pada suhu 60°C selama 3 jam.

2.1.3 Pembuatan Bricket

Tahapan ini merujuk kepada penelitian Zhang dkk (2016) dan Yudhistira dkk (2017). Pelepah bagian keras dibersihkan dan dicacah hingga berukuran ± 5 cm lalu dijemur selama 3 hari. Pelepah kemudian dikeringkan lebih lanjut menggunakan oven selama 15 menit (65°C). Pelepah dimasukkan ke reaktor pirolisis (550°C, 5 menit) hingga menghasilkan arang, yang seterusnya dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 20 *mesh*. Serbuk arang yang ukurannya telah seragam lalu dicampurkan dengan perekat tapioka 22% dengan perbandingan rasio perekat sebesar 30% terhadap berat arang. Terakhir, *bricket* dicetak dan dikeringkan pada temperatur 105°C selama 60 menit.

2.1.4 Pengujian dan Analisis

Hasil preparasi pelepah kelapa sawit menjadi *fluff*, *pellet* dan *bricket* yang didapat lewat penelitian ini kemudian dianalisis untuk menentukan kadar air, kadar abu, senyawa volatil, dan karbon terikat (analisa proksimat), total sulfur, nilai kalor, serta kandungan abu. Lebih lanjut, potensi *slagging* juga ditentukan dengan terlebih dahulu menghitung rasio asam basa berdasarkan rumus:

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \dots\dots\dots (1)$$

Di mana:

B/A : rasio asam basa
 Fe_2O_3 dll. : konsentrasi kandungan zat kimia pada abu (mg/l)

Indeks *slagging* dari setiap material yang dipreparasi kemudian didapat lewat persamaan berikut:

$$R_s = \frac{B}{A} \cdot S \dots\dots\dots (2)$$

Di mana:

R_s : indeks *slagging*
B/A : rasio asam basa
S : total sulfur

Sementara itu, indeks alkali masing-masing material juga ditentukan sesuai persamaan:

$$\text{Total alkali} = \frac{(Na_2O + 0,6589 K_2O) \times \% \text{ ash}}{100} \dots\dots\dots (3)$$

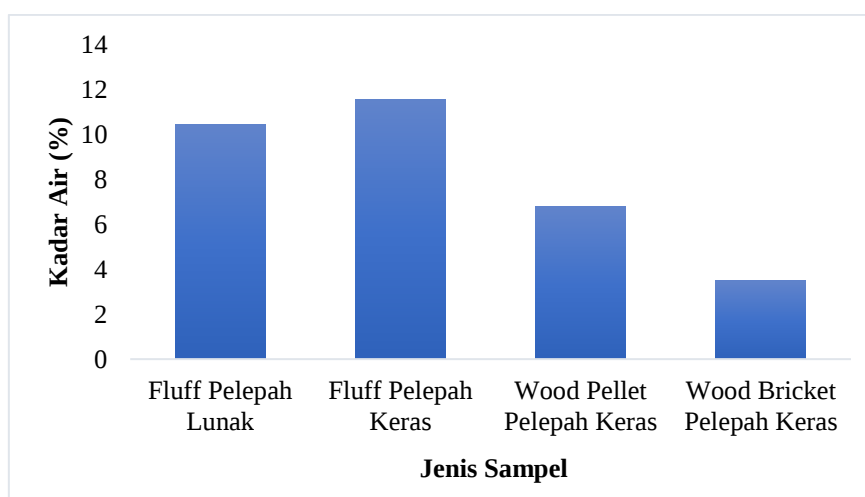
Di mana:

Na_2O : kandungan Na_2O dalam abu
 K_2O : kandungan K_2O dalam abu
% *ash* : kadar abu sampel

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

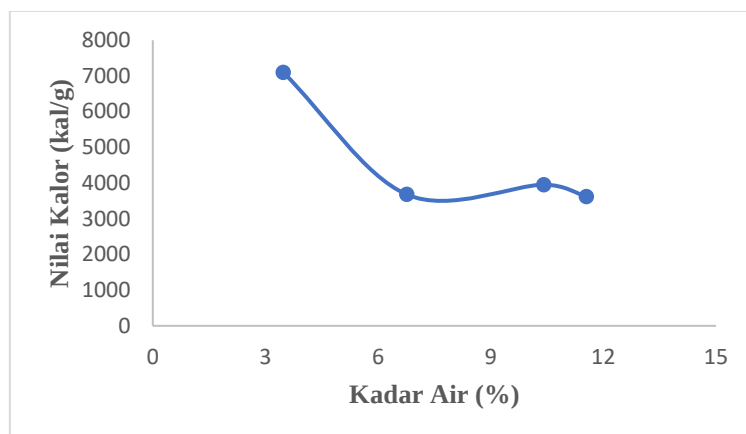
3.1 Kadar Air

Bahan bakar dengan kandungan air yang rendah diketahui akan lebih mudah terbakar. Akan tetapi, meskipun sama-sama dikategorikan dalam golongan *fluff*, pada Gambar 1 terlihat bahwa *fluff* yang dibuat dari pelepah lunak ternyata memiliki kadar air yang lebih rendah (10,42%) dibandingkan *fluff* pelepah keras (11,55%). Menurut Darmansyah dkk (2021), hal ini dapat terjadi karena kayu keras memiliki kerapatan lebih besar, sehingga untuk menguapkan air yang terkandung di dalamnya dibutuhkan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan pada pelepah lunak. Kandungan air kedua tipe *fluff* juga lebih besar dibandingkan pada *pellet* dan *bricket* sebagai akibat dari proses pengeringan yang lebih singkat. Semakin lama pengeringan serta semakin tinggi suhunya, penguapan air menjadi lebih intensif dan kadarnya pun menurun, seperti yang tampak pada tipe *pellet* dengan capaian kadar air 6,77% melalui pengeringan dua kali, serta *bricket* (3,48%) yang telah melewati proses pirolisis suhu tinggi. *Bricket* pada penelitian menunjukkan hasil yang terbaik di antara keempatnya. Selain itu, nilai kadar airnya juga lebih rendah dibandingkan *bricket* yang dipreparasi dengan rasio tapioka terhadap arang sebesar 50% (Saputra dkk, 2021). Hal ini disebabkan oleh kemampuan tapioka mengikat air, sehingga rasio yang lebih kecil seperti pada penelitian (30%) akan lebih disukai dalam pembuatan suatu bahan bakar.



Gambar 1. Pengaruh Jenis Sampel terhadap Kadar Air Bahan Bakar Padat

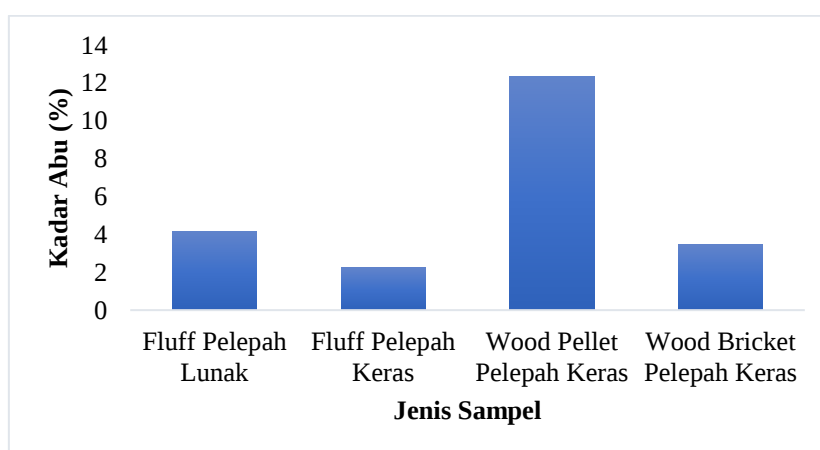
Di sisi lain, kandungan air pada bahan bakar juga memiliki pengaruh, yang mana kadar air yang tinggi akan menurunkan nilai kalor. Oleh karena itu, sampel bahan bakar harus dikeringkan sebelum dipergunakan untuk membebaskannya dari kandungan air. Pada penelitian ini, efek yang diberikan kandungan air terhadap nilai kalor bahan bakar disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh Kadar Air Sampel terhadap NCV (kcal/g) Bahan Bakar Padat

3.2 Kadar Abu

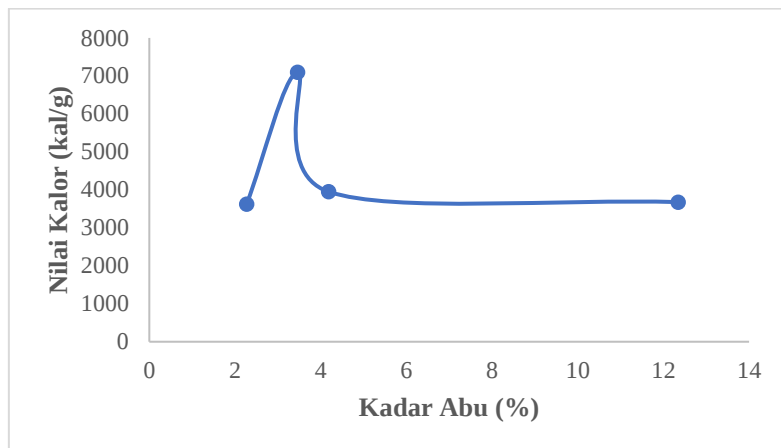
Pembentukan kerak pada mesin dapat dihindari melalui pemilihan bahan bakar dengan kadar abu yang rendah. Berdasarkan Gambar 3 pada penelitian ini, *fluff* pelepah keras didapati menghasilkan kadar abu yang paling rendah (2,27%) dibandingkan tiga bahan bakar lainnya. Temuan ini dapat disebabkan oleh proses preparasi yang tidak melibatkan penambahan perekat seperti pada *pellet* dan *bricket*. Saputra dkk (2021) menerangkan bahwa penambahan tapioka sebagai perekat juga berkontribusi terhadap peningkatan kadar abu karena menyisakan sisa pembakaran. Meskipun begitu, kadar abu pada *bricket* (3,46%) masih jauh lebih rendah dibandingkan *wood pellet* (12,34%), karena suhu tinggi pada proses pirolisis preparasi *bricket* juga membantu menghasilkan kandungan abu yang lebih rendah. *Fluff* pelepah lunak tidak menunjukkan hasil sebaik *fluff* pelepah keras sebagai pengaruh dari kandungan senyawa alkali yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan baku juga penting. Penelitian oleh Maryono dkk (2013) menunjukkan bahwa briket dari tempurung kelapa memiliki kadar abu senilai 7,49%, yang mana lebih besar daripada kadar abu briket pelepah sawit yang diteliti. Oleh karena, pelepah kelapa sawit dapat menjadi pilihan yang baik.



Gambar 3. Pengaruh Jenis Sampel terhadap Kadar Abu Bahan Bakar Padat

Kandungan abu yang tinggi tidak diinginkan pada suatu bahan bakar karena abu akan tersisa saat pembakaran berakhir dan tidak menghasilkan kalor (Malakauseya dkk, 2013). Pada

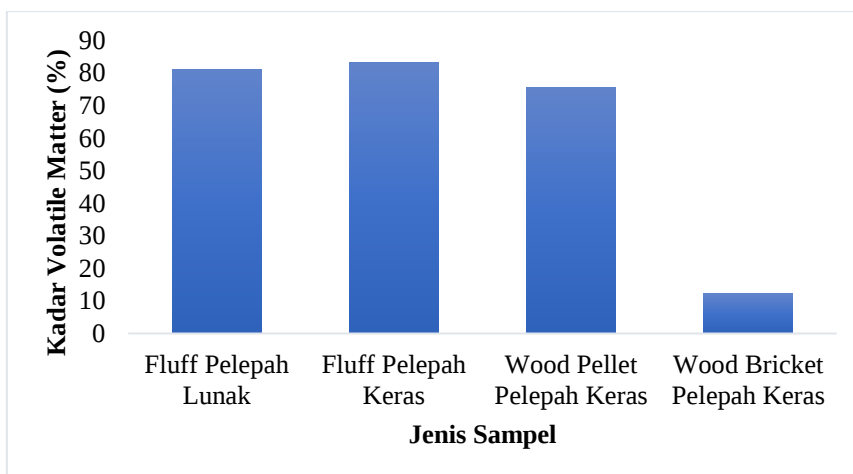
penelitian ini, efek yang diberikan kandungan abu terhadap nilai kalor bahan bakar disajikan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh Kadar Abu Sampel terhadap NCV (kal/g) Bahan Bakar Padat

3.3 Kadar Zat Volatil (*Volatile Matter*)

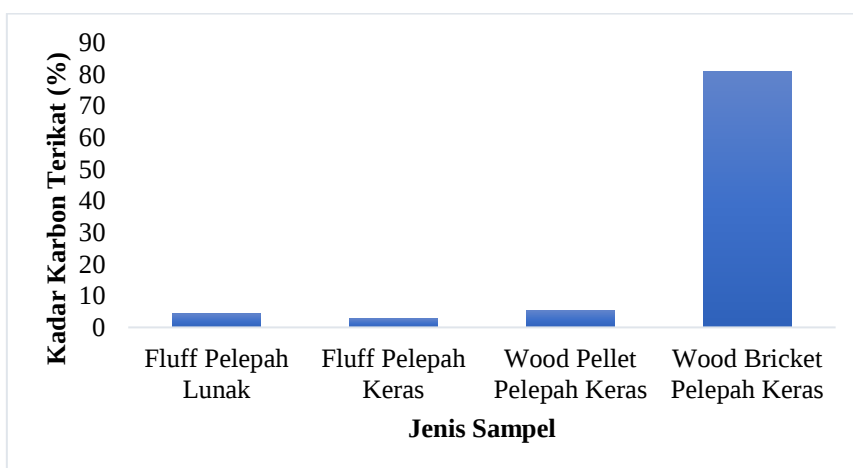
Kandungan zat-zat mudah menguap (volatil) pada bahan bakar dapat menimbulkan tar dan asap saat dibakar (Kumar dan Anand, 2019). Kadarnya yang tinggi harus dihindari karena dapat memberi dampak negatif bagi lingkungan dan mesin pembakaran. Maka dari itu, berdasarkan data penelitian pada Gambar 5, tipe *wood bricket* pelepah keras merupakan bahan bakar dengan kualitas terbaik dari segi parameter ini. *Bricket* dengan kadar zat volatil sebesar 12,21% merupakan yang terendah dibandingkan *pellet* (75,44%), *fluff* pelepah keras (83,3%), dan *fluff* pelepah lunak (81,04%). Pengaruh suhu pemanasan juga ditemukan di sini. Proses pirolisis pada pembuatan *bricket* membantu tidak hanya eliminasi kandungan air namun juga zat-zat volatil, sehingga kadar volatil pada *bricket* terlihat jauh berbeda. Dugaan ini diperkuat oleh penelitian yang dilakukan Yudhistira dkk (2017) yang mengaplikasikan pembakaran pada suhu 300°C. Meskipun temperatur tersebut sudah cukup tinggi, nyatanya kadar zat volatil pada bahan bakar tersebut masih berada pada rentang 56,63–63,67%, menunjukkan bahwa pemilihan temperatur berperan sangat penting.



Gambar 5. Pengaruh Jenis Sampel terhadap Kadar Zat Volatil Bahan Bakar Padat

3.4 Kadar Karbon Terikat (*Fixed Carbon*)

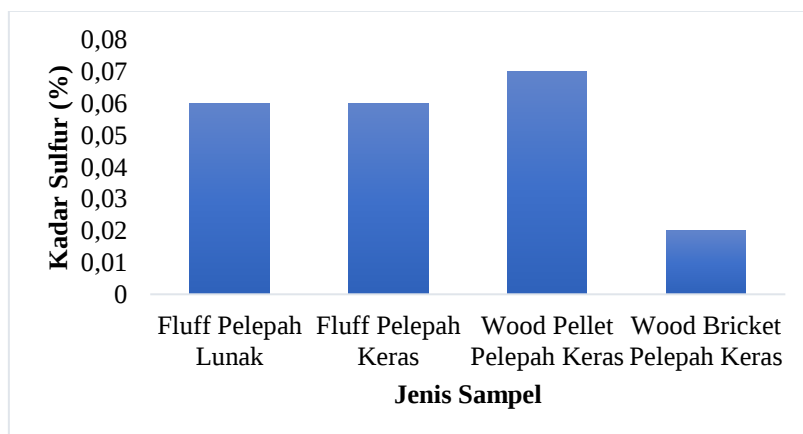
Karbon terikat adalah komponen penyusun bahan bakar yang merupakan apa pun selain air, abu serta zat volatil. Suatu bahan bakar yang baik ditandai dengan kadar karbon terikat yang tinggi. Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa kadar karbon terikat tertinggi pada penelitian ini ditemukan pada tipe *bricket* (80,85%), diikuti oleh *pellet* (5,58%), *fluff* pelepah lunak (4,36%), lalu *fluff* pelepah keras sebagai yang terendah (2,88%). Shaker dan Fenjan (2023) menjelaskan bahwa peningkatan porositas dan jumlah gugus fungsi asam dari suatu biomassa dapat menjadi penyebab dari penurunan kadar karbon terikat. Selain itu, pemrosesan bahan lewat pirolisis dan torefikasi menyebabkan pembakaran lebih efisien sehingga kadar karbon terikat pun meningkat (Akogun dan Waheed, 2019). Sebuah penelitian berbeda memanfaatkan pelepah sawit sebagai *bricket* dengan *crude glycerol* sebagai perekat, namun karbon terikatnya yang tak lebih dari 71,4% masih bernilai lebih rendah daripada *bricket* pelepah sawit-perekat tapioka pada penelitian ini. Dengan kadar karbon terikat yang lebih besar, *bricket* yang diteliti dapat memiliki nilai kalor yang lebih tinggi.



Gambar 6. Pengaruh Jenis Sampel terhadap Kadar Karbon Terikat Bahan Bakar Padat

3.5 Kadar Sulfur

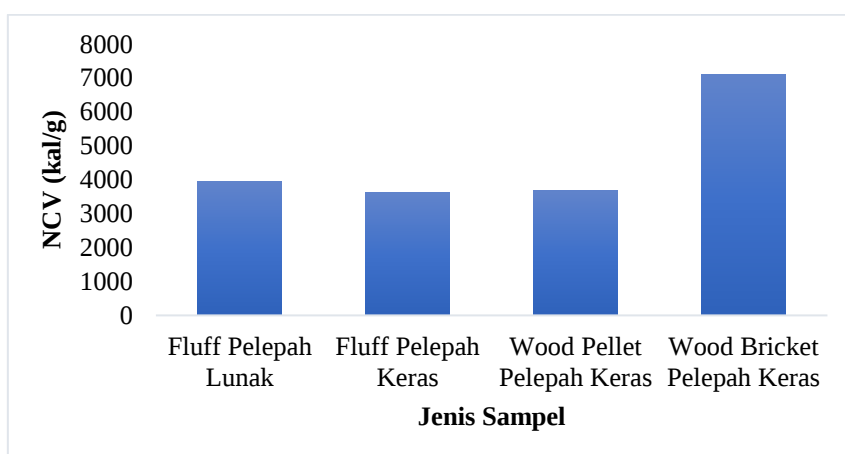
Secara alami, pelepah sawit memiliki kandungan sulfur sebesar 11% (Sulaiman dkk, 2015). Kadarnya pada bahan bakar yang diteliti pun perlu dianalisa karena sifat emisi sulfur yang dapat memberi dampak buruk bagi lingkungan. Berdasarkan SNI 8966:2021, ambang batas sulfur yang aman adalah sebesar 1,5% berat. Pada penelitian ini, seperti yang tampak dari Gambar 7, semua tipe bahan bakar telah berada di bawah ambang batas, dengan kadar sulfur sebesar 0,02% untuk *bricket*, 0,07% untuk *pellet*, dan 0,06% untuk kedua *fluff*. Disimpulkan oleh Tambaria dan Serli (2019), biomassa yang terkarbonisasi akan memiliki kadar sulfur yang lebih rendah dibandingkan yang tidak, di mana hal itu sejalan dengan data yang ditunjukkan *bricket* pada penelitian apabila dibandingkan ketiga tipe bahan bakar lain. Meskipun demikian, hasil yang diperoleh sudah lebih baik daripada beberapa jenis bahan bakar lain dengan bahan baku berbeda. Suatu *bricket* dari campuran pelepah kelapa sawit dan *sludge* limbah cair pabrik sawit yang diteliti Hassan dkk (2013) diketahui memiliki kadar sulfur sebesar 0,4%, sementara *bricket* dari cangkang biji sawit memiliki kandungan sulfur senilai 0,22% (Bonsu dkk, 2020). Melalui perbandingan tersebut, pelepah sawit menunjukkan potensi yang baik.



Gambar 7. Pengaruh Jenis Sampel terhadap Kadar Sulfur Bahan Bakar Padat

3.6 Nilai Kalor

Menurut Santosa dan Soemarno (2014), nilai kalor (*Calorific value* atau CV) adalah jumlah energi panas maksimum yang dihasilkan bahan bakar lewat pembakaran sempurna per satuan massa atau volume bahan bakar tersebut. NCV (*net calorific value*) merupakan salah satu jenis nilai kalor yang menyatakan panas yang dapat dimanfaatkan dari suatu bahan bakar pada tekanan tetap. Maka dari itu, sampel *bricket* yang memiliki nilai NCV tertinggi (7095 kal/g) pada penelitian ini merupakan yang terbaik dari segi nilai kalor. Sementara itu seperti pada Gambar 8, nilai NCV pada ketiga bahan bakar lainnya tidak jauh berbeda, yakni *fluff* pelepah lunak sebesar 3953 kal/g, *pellet* sebesar 3677 kal/g, dan *fluff* pelepah keras sebesar 3620 kal/g. Menurut Basu (2018), faktor terpenting yang menentukan nilai kalor bahan-bahan bakar yang sejenis bukanlah ukuran partikel melainkan temperaturnya, sehingga proses pirolisis bersuhu tinggi pada *bricket* menjadi sangat menguntungkan. Penelitian oleh Nunes dkk (2017) telah membandingkan bahwa NCV kayu yang dipirolisis lebih baik daripada kayu yang tidak dipirolisis dengan nilai tertinggi sebesar 5254 kal/g karena densitas energi meningkat. Pada penelitian ini, *bricket* pelepah sawit menunjukkan NCV yang lebih tinggi, termasuk bila dibandingkan dengan bahan bakar dari tandan kosong kelapa sawit yang memiliki NCV senilai 4597 kal/g (Amri dkk, 2021). Dengan demikian, selain faktor temperatur, perbedaan karakteristik asli biomassa juga harus diperhatikan.



Gambar 8. Pengaruh Jenis Sampel terhadap NCV (kal/g) Bahan Bakar Padat

3.7 Kandungan Kimia pada Abu (*Chemical Analysis of Ash*)

Perbedaan persentase komposisi tiap-tiap senyawa oksida pada abu dapat disebabkan oleh prosedur preparasi yang berlainan sehingga transformasi unsur-unsur tersebut menjadi saling berbeda. Merujuk kepada Tabel 1, oksida Na, K, dan Ca pada tipe *bricket* terlihat memiliki kadar yang paling tinggi di antara keempat bahan bakar. Dalam hal ini, adisi tapioka pada campuran *bricket* ikut berperan karena Na, K, dan Ca juga merupakan unsur-unsur penyusun tapioka (Samuel dkk, 2012). Sementara itu, P terdeteksi paling banyak pada abu *fluff* pelepah lunak, diakibatkan kecenderungan unsur hara *mobile* seperti P untuk menempati jaringan muda dan aktif seperti yang terdapat pada ujung pelepah (Werkelin dkk, 2010).

Tabel 1. Hasil analisa kandungan kimia pada abu bahan bakar pelepah sawit

Jenis Sampel	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	MnO ₂ (%)
<i>Fluff</i> Pelepah Lunak	28,6	1,04	21,7	21,8	5,23	9,25	2,86	1,24	5,36	2,3	0,35
<i>Fluff</i> Pelepah Keras	38,6	1,46	10,49	21,6	7,1	9,25	2,57	1,7	4,4	2,2	0,44
<i>Wood Pellet</i> Pelepah Keras	89,5	0,67	0,26	2,5	0,58	3,75	0,77	0,02	1,04	0,5	0,11
<i>Wood Bricket</i> Pelepah Keras	26,6	4,41	3,15	39,1	5,61	10,9	3,71	0,26	2,84	2,3	0,42

3.8 Analisa Potensi *Slagging* dan *Fouling*

Setiap senyawa oksida pada abu dapat dikelompokkan berdasarkan sifat keasamannya. SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, P₂O₅, dan SO₃ merupakan senyawa golongan oksida asam, sementara Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, dan K₂O tergolong sebagai oksida basa (Aditya dkk, 2022). Keduanya bersifat sama-sama menentukan besarnya potensi *slagging* dan *fouling* dari suatu bahan bakar. *Slagging* merupakan fenomena penumpukan abu hasil pembakaran bahan bakar pada dinding tanur. Terbentuknya *slagging* dan *fouling* akan meningkatkan temperatur gas buang keluar tanur sehingga konsumsi bahan bakar pada *boiler* meningkat. Maka dari itu, potensi *slagging* dan *fouling* suatu bahan bakar harus ditentukan untuk mengetahui kelayakannya. Dalam hal ini, seperti yang tampak pada Tabel 2, kriteria *slagging* yang diteliti terdiri dari parameter rasio asam basa dan indeks *slagging*, sementara kriteria *fouling* yang diteliti adalah indeks alkali.

Tabel 2. Kriteria risiko *slagging* dan *fouling*

No	Parameter	Kriteria Risiko				Referensi
		Rendah	Sedang	Tinggi	Parah	
Kriteria <i>Slagging</i>						
1	Rasio Asam Basa	< 0,4 atau > 0,7		0,4 – 0,7		Babcock & Wilcox,2005
2	Indeks <i>Slagging</i>	< 0,6	0,6 – 2,0	2,0 – 2,6	> 2,6	Babcock & Wilcox, 2005
Kriteria <i>Fouling</i>						
3	Indeks Alkali	< 0,3	0,3 – 0,45	0,45 – 0,6	> 0,6	Winegartner, 1974

Potensi *slagging* dan *fouling* yang rendah menggambarkan kemungkinan yang lebih kecil bagi terbentuknya deposit pada *boiler*. Hariana dkk (2020) menemukan bahwa campuran antara batubara *bituminous* dan tandan kosong sawit memiliki rasio asam basa: 0,077; indeks

slagging: 0,02, dan; indeks alkali: 0,08. Sementara itu, biomassa bunga *flax* yang diamati Lachman dkk (2021) memiliki rasio asam basa sebesar 0,09. Keduanya menunjukkan kesesuaian secara umum dengan data dari Tabel 3 pada penelitian ini meski dengan sedikit perbedaan. Hal itu dikarenakan jenis biomassa yang berlainan akan menghasilkan perbedaan kandungan abu, sehingga secara alami nilai setiap parameter juga akan saling berbeda.

Tabel 3. Hasil perhitungan analisa potensi *slagging* dan *fouling*

No	Jenis Sampel	Rasio Asam Basa	Indeks <i>Slagging</i>	Indeks Alkali
1	<i>Fluff</i> Pelepah Lunak	1,971	0,118	0,374
2	<i>Fluff</i> Pelepah Keras	1,223	0,073	0,196
3	<i>Wood Pellet</i> Pelepah Keras	0,087	0,006	0,4
4	<i>Wood Bricket</i> Pelepah Keras	1,996	0,039	0,377

Berdasarkan data pada Tabel 4, keempat bahan bakar dari biomassa pelepah kelapa sawit memiliki tingkat kriteria risiko antara “rendah” hingga “sedang”. Hal ini dikarenakan kandungan K_2O dan Na_2O pada sampel masih tergolong dalam kategori kecil hingga menengah. Kenaikan kadar kedua oksida tersebut akan meningkatkan indeks *slagging* dan *fouling*, sehingga hal ini menjadi permasalahan tersendiri untuk aplikasi biomassa sebagai bahan bakar pengganti batubara. Menurut Basu (2018), meski kadar abu pada batubara cukup tinggi (13,4%), kandungan alkali dalam biomassa jauh lebih kaya. Kadar alkali seperti Na, K, dan Ca pada batubara secara berurutan hanyalah sebesar 2,47%, 0,62%, dan 0,42%, ketiganya jauh lebih rendah daripada yang teramati pada sampel (lihat Tabel 1). Hariana dkk (2020) kemudian membuktikan bahwa pencampuran batubara dengan tandan kosong sawit dalam persentase yang lebih besar akan diikuti oleh peningkatan risiko *slagging* dan *fouling*. Hal tersebut menunjukkan bahwa kandungan alkali dalam biomassa dapat menjadi masalah, dan oleh karena itu, memilih biomassa dengan kadar alkali yang rendah juga harus diperhatikan.

Tabel 4. Hasil kriteria risiko analisa potensi *slagging* dan *fouling*

No	Jenis Sampel	Asam Basa	Indeks <i>Slagging</i>	Indeks Alkali
1	<i>Fluff</i> Pelepah Lunak	Sedang	Rendah	Sedang
2	<i>Fluff</i> Pelepah Keras	Sedang	Rendah	Rendah
3	<i>Wood Pellet</i> Pelepah Keras	Rendah	Rendah	Sedang
4	<i>Wood Bricket</i> Pelepah Keras	Sedang	Rendah	Sedang

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa proksimat, total sulfur, dan nilai kalor, bahan bakar tipe *wood bricket* pelepah keras (NCV = 7095 kal/g atau 29,705 MJ/kg) memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan bentuk *fluff* dan *pellet*. Sementara itu, biomassa tipe *fluff* pelepah keras dan *fluff* pelepah lunak memiliki performa yang serupa dengan kadar sulfur yang sama (0,06%). Dengan demikian, disimpulkan bahwa penggunaan pelepah lunak ataupun keras sebagai alternatif bahan bakar jumputan padat untuk pembangkit listrik adalah sama kualitasnya. Analisa potensi *slagging* dan *fouling* juga menunjukan bahwa semua jenis sampel pelepah

kelapa sawit yang diteliti memberikan hasil analisa yang cukup baik karena memiliki tingkat risiko rendah hingga sedang.

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.
- Akogun, O., & Waheed, A. (2019). Property Upgrades of Some Raw Nigerian Biomass through Torrefaction Pre-Treatment- A Review. *Journal of Physics: Conference Series*. 1378, 1-14.
- Amri, I., Muchlis, T., & Helwani, Z. (2021). Upgrading karakteristik biopellet tandan kosong sawit dengan penambahan oil sludge sebagai co-firing. *Journal of Bioprocess, Chemical, and Environmental Engineering Science*. 1, 1-11.
- Babcock, G.H., & Wilcox, S. (2005). *Steam: Its Generation and Use*. Ohio: McDermott Company.
- Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefication (2nd Ed)*. New York: Elsevier Inc.
- Bonsu, B. O., Takase, M., & Mantey, J. (2020). Preparation of charcoal briquette from palm kernel shells: Case study in Ghana. *Heliyon*. 6, 1-8.
- Darmansyah, Anhar, K., Muhammad, K., & Teguh, S. (2021). Pengaruh ukuran serbuk dan kekerasan kayu terhadap kualitas syngas dari pirolisis biomassa. *Jurnal Syntax Admiration*. 2(4), 592-600.
- Dey, I., Irwan, S., & Hengky, A. (2016). Pemanfaatan biomassa serbuk gergaji sebagai penyerap logam timbal. *Jurnal Akademika Kimia*. 5(4), 166-171.
- Duan, L., Duan, Y., Zhao, C., & Anthony, E. J. (2015). NO emission during co-firing coal and biomass in an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor. *Fuel*. 150, 8-13.
- Hariana, Fairuz, M. K., Dani, R., & Lan, M. T. N. (2020). Investigation on slagging fouling potential in coal blending for PLTU with PC boiler with droptube furnace method. *Kresna Social Science and Humanities Research*. 1, 28-40.
- Hassan, S., Kee, L. S., & Al-Kayiem, H. H. (2013). Experimental study of palm oil mill effluent and palm oil frond waste mixture as an alternative biomass fuel. *Journal of Engineering Science and Technology*. 8(6), 703-712.
- Koppejan, J., & Loo, S. V. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London: Earthscan.
- Kumar, R. M. D., & Anand, R. (2019). Production of biofuel from biomass downdraft gasification and its applications. *Advanced Biofuels*. 129-151.
- Lachman, M., Balas, M., Lisy, M., Lisa, H., Milcak, P., & Elbi, P. (2021). An overview of slagging and fouling indicators and their applicability biomass fuels. *Fuel Processing Technology*. 217, 1-10.
- Maryono, M., Sudding, S., & Rahmawati, R. (2013). Pembuatan dan analisis mutu briket arang tempurung kelapa ditinjau dari kadar kanji. *Jurnal Chemica*. 14(1), 74-83.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. D. O., & Catalão, J. P. D. S. (2017). *Torrefaction of Biomass for Energy Applications*. Amsterdam: Academic Press.
- Qurotullaili, Q., Komalasari, K., & Helwani, Z. Bahan bakar padat dari pelepah sawit menggunakan proses karbonisasi dengan variasi ukuran bahan baku dan suhu. *JOM FTEKNIK*. 4(1), 1-5.

- Retno, D., Joko, P., & Novia, L. (2017). Studi pengaruh ukuran partikel dan penambahan perekat tapioka terhadap karakteristik biopellet dari kulit coklat (*Theobroma Cacao L.*) sebagai bahan bakar alternatif terbarukan. *Jurnal Teknotan*. 11(1), 51-60.
- Samuel F. O., Otegbayo, B. O., & Alalade, T. (2012). Nutrient and anti-nutrient content of soy-enriched tapioca. *Food Nutr Sci*. 3(6), 784-789.
- Santosa, S., & Soemarno. (2014). Peningkatan nilai kalor produk pada produk proses bio-drying sampah organik. *Indonesian Green Technology Journal*. 3(1), 29-37.
- Saputra, D., Siregar, A. L., & Rahardja, I. B. (2021). Karakteristik briket pelepah kelapa sawit menggunakan metode pirolisis dengan perekat telung tapioka. *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa dan Inovasi*. 3(2), 143-156.
- Shaker, B., & Fenjan, R. (2023). Characterization of bio-char produced from sesbania stems (*sesbania grandiflora*). *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 27(2), 204-212.
- Sulaiman, S. A., Balamohan, S., Moni, M. N. Z., Atnaw, S. M., & Mohamed, A. O. (2015). Feasibility study of gasification of palm oil fronds. *Journal of Mechanical and Sciences*. 9, 1744-1757.
- Sunaryo, S., Laia, M., & Hakim, L. (2018). Karakteristik bahan bakar pellet biomassa campuran pelepah kelapa sawit dan getah pohon pulai yang diaplikasikan pada kompor biomassa. *TURBO*. 7(2), 147-152.
- Tambara, T. N., & Serli, B. F. Y. (2019). Kajian analisis proksimat pada briket batubara dan briket biomassa. *Jurnal Geosains dan Teknologi*. 2(2), 77-86.
- Werkelin J., Skrifvars, B.-J., Zevenhoven, M., Holmbom, B., & Hupa, M. (2010). Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*. 89, 481-493.
- Winegartner, E.C. (1974). *Coal Fouling and Slagging Parameters*. USA: The American Society of Mechanical Engineers.
- Yudhistira, P., Zuchra, H., & Komalasari, K. (2017). Pembuatan briket pelepah sawit menggunakan proses torefaksi pada variasi tekanan dan penambahan perekat tapioka. *JOM FTEKNIK*. 4(1), 1-6.
- Zahari, M. W., Alimon, A.R., & Wong, H.K. (2012). Utilization of oil palm co-products as feeds for livestock in malaysia. *Biofuel Co-products as Livestock Feed-Opportunities and Challenges*. 13, 243-262.
- Zhang, S., Hu, B, Zhang, L, & Xiong, Y. (2016). Effects of torrefaction on yield and quality of pyrolysis char and its application on preparation of activated carbon. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 119(25), 217-223.