



PENGARUH VARIASI KOMPOSISI TANDAN KOSONG SAWIT DAN MESOKARP TERHADAP KUALITAS BIOPELET YANG MEMENUHI STANDAR SNI 8675:2018

Said Zul Amraini^{1*}, Rozanna Sri Indarty¹, Azzahra Uthami Evionitra¹, Tasya Nabela¹,
Zuchra Helwani¹, Ali Ahmudi²

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Riau, Pekanbaru,
28293, Indonesia

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, Depok,
28293, Indonesia

*Corresponding Author: saidzulamraini@eng.unri.ac.id

Abstrak

Limbah biomassa dari industri kelapa sawit, seperti tandan kosong sawit (TKS) dan mesokarp, memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam pembuatan biopellet, yang merupakan alternatif bahan bakar ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi komposisi antara TKS dan mesokarp terhadap kualitas biopellet yang dihasilkan, serta untuk memastikan bahwa produk biopellet memenuhi standar nasional Indonesia (SNI) 8675:2018. Penelitian ini juga mengeksplorasi variasi ukuran partikel 30 dan 60 mesh, serta penggunaan tepung tapioka sebagai perekat untuk meningkatkan kualitas biopellet. Empat perbandingan campuran bahan baku (b/b) diuji, yaitu 70% TKS:20% mesokarp, 50% TKS:40% mesokarp, 40% TKS:50% mesokarp, dan 30% TKS:60% mesokarp. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biopellet terbaik diperoleh dari campuran TKS 40%, mesokarp 50%, dan tepung tapioka 10% dengan ukuran partikel 60 mesh. Biopellet tersebut memiliki kerapatan 0,89 g/cm³, kadar air 2,75%, kadar abu 13,07%, kadar karbon terikat 28,62%, dan nilai kalor 5239,43 kal/g, yang semuanya kecuali kadar abu, memenuhi kriteria yang ditetapkan dalam SNI 8675:2018. Penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam optimasi pemanfaatan limbah kelapa sawit dengan menghasilkan biopellet berkualitas tinggi yang memenuhi standar nasional.

Kata Kunci: Biopellet; Mesokarp; SNI 8675:2018; Tandan kosong sawit; Tepung tapioka

Abstract

Biomass waste from the palm oil industry, such as empty fruit bunches of palm oil (EFB) and mesocarp, has excellent potential for use as a raw material in manufacturing biopellets and environmentally friendly fuel alternative. This study aimed to examine the influence of composition variations between EFB and mesocarp on the quality of the biopellets produced and to ensure that biopellet products meet the Indonesian National Standard (SNI) 8675:2018. The study also explored variations in the particle sizes of 30 and 60 mesh and tapioca flour as an adhesive to improve the quality of biopellets. Four raw material mixture ratios (w/w) were tested: 70% EFB: 20% mesocarp, 50% EFB: 40% mesocarp, 40% EFB: 50% mesocarp, and 30% EFB: 60% mesocarp. The results showed that the best biopellets were obtained from a mixture of 40% EFB, 50% mesocarp, and 10% tapioca flour with a particle size of 60 mesh. The biopellets have a density of 0.89 g/cm³, a moisture content of 2.75%, an ash content of 13.07%, a bonded carbon content of 28.62%, and a calorific value of 5239.43 cal/g, all of which meet the criteria set out in SNI 8675:2018 except for the ash content. This research contributes to optimizing the utilization of palm oil waste by producing high-quality biopellets that meet national standards.

Keywords: Bio-pellets; Empty fruit bunches; Mesocarp; SNI 8675:2018; Tapioca flour

1. PENDAHULUAN

Energi terbarukan merupakan salah satu pendekatan utama dalam menghadapi tantangan energi global dan perubahan iklim. Salah satu jenis energi terbarukan yang potensial adalah biomassa, yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan biopelet. Biopelet adalah bahan bakar padat yang dihasilkan dari biomassa dan memiliki peran signifikan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Berdasarkan penelitian Wahyono et al. (2021), biopelet yang dibuat dari limbah pertanian, termasuk tandan kosong sawit (TKS) dan mesokarp, memberikan dampak positif terhadap pengurangan emisi karbon dioksida sekaligus memanfaatkan limbah secara efisien. Komitmen Indonesia dalam mengurangi dampak perubahan iklim dengan menargetkan penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 29% pada tahun 2030 sesuai dengan kesepakatan Paris Agreement pada tahun 2015 yang dihadiri oleh 195 negara.

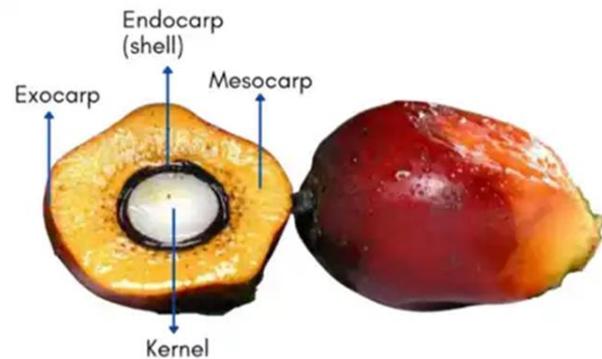
Dalam konteks industri kelapa sawit, TKS dan mesokarp merupakan limbah yang dihasilkan dalam jumlah besar. Data menunjukkan bahwa Indonesia, sebagai negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia, menghasilkan lebih dari 80 juta ton TKS setiap tahunnya (Brunerová et al., 2018). Namun, pemanfaatan limbah ini masih jauh dari optimal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh variasi komposisi TKS dan mesokarp terhadap kualitas biopelet yang dihasilkan, serta kesesuaiannya dengan standar SNI 8675:2018.

Masalah utama dalam penelitian ini adalah bagaimana variasi komposisi TKS dan mesokarp dapat mempengaruhi kualitas biopelet. Kualitas biopelet sangat penting untuk memastikan efisiensi pembakaran dan emisi yang rendah. Beberapa parameter kualitas yang perlu diperhatikan antara lain densitas, kadar air, kandungan abu, dan nilai kalor. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa komposisi bahan baku memiliki dampak signifikan terhadap karakteristik fisik dan kimia dari biopelet (Zulfian et al., 2015)

Solusi umum yang diusulkan adalah pemanfaatan limbah sawit, khususnya tandan kosong sawit dan mesokarp, untuk pembuatan biopelet yang memenuhi standar kualitas energi terbarukan. Dengan memanfaatkan teknologi dan proses pembuatan yang sederhana, biopelet dapat diproduksi dengan biaya rendah dan memiliki potensi pasar yang substansial di Indonesia.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas produksi biopelet dari berbagai jenis limbah sawit, seperti tandan kosong, mesokarp (Gambar 1), cangkang, maupun pelepah. Santo et al. (2023) mengkaji pembuatan biopelet dari limbah tandan kosong sawit sebagai bahan bakar alternatif. Penelitian lainnya oleh Mardikatama et al. (2024) memfokuskan pada biopelet yang dibuat dari campuran tempurung kelapa dan sekam padi. Sementara itu, (Zulfian et al., 2015) meneliti kualitas biopelet yang dihasilkan dari limbah batang kelapa sawit dengan variasi ukuran serbuk dan jenis perekat. Munawar & Subiyanto (2014) meninjau karakteristik biopelet berbahan dasar limbah

dari industri kelapa sawit, termasuk TKS, pelepah, cangkang, dan mesokarp. Secara umum, temuan-temuan ini menunjukkan bahwa biopelet dari limbah sawit dapat memenuhi standar kualitas nasional Indonesia berdasarkan SNI 8675:2018.



Gambar 1. Struktur lapisan buah sawit

Namun, penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengoptimalkan komposisi bahan baku, ukuran partikel, dan penggunaan perekat yang lebih efektif agar biopelet yang dihasilkan memiliki kualitas yang lebih baik.

Meskipun penelitian-penelitian sebelumnya telah menunjukkan potensi besar limbah sawit sebagai bahan baku biopelet, masih terdapat beberapa kesenjangan dalam pemahaman mengenai kombinasi optimal antara tandan kosong sawit dan mesokarp, serta variasi ukuran partikel yang dapat mempengaruhi kualitas biopelet. Sejumlah studi, seperti yang dilakukan oleh Amri et al. (2021), juga telah mengkaji peningkatan karakteristik biopelet melalui penambahan *oil sludge* sebagai *co-firing*. Namun, hingga saat ini, belum ada penelitian yang membahas secara komprehensif mengenai pengaruh variasi komposisi tandan kosong sawit dan mesokarp terhadap kualitas biopelet, serta optimasi ukuran partikel yang sesuai dengan standar SNI 8675:2018. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang dapat mengisi kesenjangan tersebut dan memberikan kontribusi pada pengembangan biopelet dari limbah sawit yang lebih efisien dan berkualitas.



Gambar 2. Bahan baku biopelet: (a) Serbuk TKS dan (b) Bahan bakar biopelet (Brunerová et al., 2018)

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi pengaruh variasi komposisi antara tandan kosong sawit dan mesokarp terhadap kualitas biopelet yang dihasilkan, serta menguji apakah biopelet yang dihasilkan memenuhi SNI 8675:2018. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi

pengaruh ukuran partikel (30 dan 60 mesh) serta penggunaan tepung tapioka sebagai perekat dalam meningkatkan kualitas biopelet (Gambar 2).

Dalam penelitian ini digunakan kombinasi tandan kosong sawit dan mesokarp dengan variasi ukuran partikel untuk menghasilkan biopelet yang memiliki kualitas lebih baik dan sesuai dengan standar nasional yang ditetapkan. Penelitian ini juga menguji penggunaan tepung tapioka sebagai bahan perekat yang dapat meningkatkan densitas dan nilai kalor biopelet.

Ruang lingkup penelitian ini mencakup pembuatan dan pengujian biopelet dari kombinasi berbagai komposisi tandan kosong sawit dan mesokarp, serta variasi ukuran partikel dan perekat. Penelitian ini akan difokuskan pada pengujian kualitas biopelet berdasarkan parameter-parameter seperti densitas, kadar air, kadar abu, kandungan karbon terikat, dan nilai kalor, dengan tujuan untuk memenuhi standar SNI 8675:2018.

2. BAHAN DAN METODE

2.1 Bahan

Bahan-bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tandan kosong kelapa sawit dan mesokarp yang diperoleh dari PTPN V Sungai Pagar, Kabupaten Kampar, Riau. Selain itu, tepung tapioka dan akuades sebagai bahan tambahan.

2.2 Variabel Penelitian

2.2.1. Variabel tetap

Variabel tetap pada penelitian ini sebagai berikut:

- Suhu pengeringan bahan baku: 110°C (Kurniawan et al., 2022)
- Suhu pengeringan biopelet: 110°C (Kurniawan et al., 2022)
- Suhu analisis kadar abu: 750°C (Mawardi et al., 2023)
- Waktu analisis kadar abu: 5 jam
- Suhu analisis zat menguap: 950°C (Mawardi et al., 2023)
- Waktu analisis zat menguap: 10 menit (Mawardi et al., 2023)
- Kadar air bahan baku: ≤ 12%
- Perekat tepung tapioka: 10%

2.2.2. Variabel berubah

Variabel berubah pada penelitian ini adalah komposisi tandan kosong sawit dan mesokarp (b/b) (70:20; 50:40; 40:50; 30:60) serta ukuran ayakan 30 dan 60 mesh.

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Persiapan bahan baku biopelet

Pada tahap awal persiapan, tandan kosong sawit dan mesokarp dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C selama 24 jam hingga kadar air bahan mencapai ≤ 12%. Setelah bahan kering, langkah selanjutnya adalah memotongnya menjadi bagian kecil-kecil dan menggilingnya menggunakan alat penggiling. Setelah digiling, bahan kemudian diayak dengan menggunakan

saringan berukuran 30 dan 60 mesh sesuai prosedur yang dijelaskan oleh (Haryanto et al., 2021).

2.3.2 Pencampuran bahan baku biopelet dengan perekat

Pada tahap pencampuran, tepung tapioka dilarutkan dalam akuades di dalam labu ukur hingga mencapai tanda batas. Campuran tersebut kemudian diaduk hingga merata. Larutan yang homogen dipindahkan ke dalam gelas kimia dan dipanaskan menggunakan *hot plate* hingga mengental. Selanjutnya, tandan kosong sawit dan mesokarp yang telah digiling dicampur dengan larutan perekat, di mana jumlah perekat yang digunakan setara dengan 10% dari berat bahan baku (Nurhilal & Sri, 2018).

2.3.3 Pencetakan biopelet

Pada tahap ini, serbuk bahan baku yang telah dicampur dengan larutan perekat dicetak menggunakan alat pencetak biopelet. Biopelet yang dihasilkan kemudian dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C hingga mencapai kadar air yang sesuai. Setelah proses pengeringan selesai, biopelet disimpan di dalam wadah tertutup untuk menjaga kualitasnya. Kemudian biopelet yang sudah dikeringkan disimpan di dalam wadah yang tidak terkontaminasi dari bakteri dan terlindung dari udara luar yang dapat meningkatkan kadar air sebelum dilakukan pengujian mutu biopelet (Ulfah et al., 2021).

2.4 Analisis

2.4.1 Kerapatan

Kerapatan didapatkan dari hasil perbandingan antara massa dan volume biopelet. Berat biopelet didapatkan dengan menimbang biopelet yang telah dikeringkan pada suhu 110°C menggunakan oven. Volume biopelet diuji untuk mengetahui seberapa besar nilai kerapatan yang terdapat di dalam biopelet. Kerapatan biopelet dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (ASTM B-311-93):

$$\text{Kerapatan} = \frac{m}{v} \quad (1)$$

di mana *m* merupakan massa sampel yang diukur dalam satuan gram (g), dan *v* adalah volume sampel yang diukur dalam sentimeter kubik (cm³).

Kerapatan ini merupakan salah satu parameter penting karena nilai kerapatan yang tepat dapat memberikan informasi mengenai kualitas fisik biopelet yang dihasilkan. Semakin tinggi kerapatan suatu biopelet, biasanya semakin berkualitas tinggi dan dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran dan nilai kalor biopelet.

2.4.2 Kadar air

Kadar air diuji dengan cara menimbang 5 gram sampel biopelet yang telah dikeringkan dan diletakkan pada cawan porselin. Kemudian biopelet dioven pada suhu 105°C selama 1 jam hingga berat konstan. Untuk menghitung kadar air dengan menggunakan rumus (ASTM D-5142):

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{a-b}{a} 100\% \quad (2)$$

di mana a adalah massa awal sampel yang diukur dalam satuan gram (g), dan b adalah massa sampel setelah pemanasan untuk menghilangkan kandungan airnya, juga diukur dalam satuan gram. Proses pemanasan dilakukan untuk mengurangi kadar air dalam sampel hingga mencapai berat konstan. Kadar air yang terlalu tinggi dapat mempengaruhi kestabilan dan efisiensi pembakaran biopellet, sehingga penting untuk memonitor nilai ini dalam proses produksi biopellet.

2.4.3 Kadar zat menguap

Kadar zat menguap didapatkan dengan menguapkan bahan tanpa oksigen pada suhu 950°C. Selisih berat dihitung sebagai zat yang hilang. Penetapan kadar zat mudah menguap dilakukan dengan meletakkan sampel lanjutan dari kadar air ke dalam cawan porselin tertutup. Cawan porselin dimasukkan ke dalam tanur pada suhu 950°C selama 7 menit. Setelah penguapan selesai, cawan didinginkan sampai kondisi stabil dan seimbang yang selanjutnya ditimbang untuk mendapatkan berat sampel setelah dipanaskan dalam tanur. Kadar zat mudah menguap dihitung menggunakan rumus (ASTM D-3175-02):

$$\text{Kadar zat menguap (\%)} = \frac{a-b}{a} 100\% \quad (3)$$

di mana a adalah massa awal sampel yang diukur dalam satuan gram (g), dan b adalah massa sampel setelah diproses dalam *furnace* untuk menghilangkan zat-zat yang mudah menguap. Proses pemanasan dalam *furnace* bertujuan untuk menghilangkan komponen-komponen yang mudah menguap, seperti air atau senyawa organik yang volatil. Hasil perhitungan kadar zat menguap ini memberikan informasi penting mengenai komposisi kimia dari sampel, yang dapat mempengaruhi kualitas dan karakteristik biopellet, seperti daya bakar dan kestabilan pada saat digunakan.

2.4.4 Kadar abu

Pengujian kadar abu dilakukan dengan meletakkan sampel lanjutan biopellet dari pengujian kadar zat menguap pada cawan porselin yang dihitung sebagai berat sampel kering tanur, kemudian dimasukkan ke dalam tanur pada suhu 750°C selama 5 jam. Biopellet kemudian didinginkan sampai kondisi stabil dan seimbang. Selanjutnya ditimbang untuk mendapatkan berat abu. Perhitungan nilai kadar abu dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut (ASTM D-3174):

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{b}{a} 100\% \quad (4)$$

di mana a adalah massa sampel setelah pemanasan pada suhu 95°C untuk menghilangkan sebagian besar kandungan air, dan b adalah massa sampel setelah pemanasan lanjut pada suhu 750°C dalam *furnace* untuk mengoksidasi dan menghilangkan senyawa organik, sehingga yang tersisa hanya abu anorganik. Perhitungan kadar abu ini penting karena abu mengindikasikan jumlah komponen mineral yang terkandung dalam sampel. Kadar abu yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan bahan baku yang kurang cocok untuk pembuatan biopellet berkualitas, karena

dapat memengaruhi proses pembakaran dan efisiensi energi.

2.4.5 Kadar karbon terikat

Prinsip penentuan kadar karbon terikat adalah menghitung fraksi karbon dalam bahan, tidak termasuk zat menguap dan abu. Kadar karbon terikat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut (ASTM D-3172-07a):

$$\text{Kadar Karbon Terikat \%} = 100\% - (\% \text{kadar abu} + \% \text{kadar menguap}) \quad (5)$$

2.4.6 Analisis nilai kalor

Pada pengujian nilai kalor digunakan *bomb calorimeter* digital, yang telah disetujui oleh ASTM D-5865M-19 yang dapat dengan cepat dan tepat menentukan nilai kalor dari bahan bakar baik yang berbentuk padat maupun cair. Sampel seberat 1 gram ditimbang, kemudian diletakkan pada cawan khusus *bomb calorimeter*. Setelah itu sampel dimasukkan ke dalam bejana, kemudian ditutup dan dimasukkan gas oksigen sampai pada tekanan 28–30 bar. Selanjutnya temperatur sebelum dan sesudah pembakaran akan langsung terbaca dan hasil nilai kalor akan muncul di komputer.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Produksi Biopellet dari Tandan Kosong Sawit dan Mesokarp sesuai Standar Nasional Indonesia

Pengujian kualitas biopellet dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan Alam Mineral, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau. Setelah memperoleh biopellet, dilakukan analisis meliputi nilai kerapatan, kadar air, kadar zat menguap, kadar karbon terikat, dan nilai kalor untuk menentukan kualitasnya.

Hasil pengujian (Tabel 1) menunjukkan bahwa biopellet memenuhi sebagian besar parameter SNI 8675:2018, termasuk kadar air, kadar zat menguap, kadar karbon terikat, dan nilai kalor, kecuali untuk kadar abu yang sedikit melampaui batas maksimal 1,5%.

3.2 Pengaruh Variasi Ukuran Ayakan Terhadap Kualitas Biopellet

3.2.1 Pengujian kadar air bahan baku

Sebelum dilakukan pencampuran dilakukan pengujian kadar air bahan baku. Bahan baku utama dari penelitian ini adalah tandan kosong sawit dan mesokarp yang diambil dari PT Perkebunan Nusantara V Sei. Pagar. Uji kualitas bahan baku ini dilakukan setelah preparasi bahan baku. Hasil analisis kadar air bahan baku dapat dilihat dari Tabel 2.

Tabel 1. Hasil analisis parameter pengujian kualitas biopelet berdasarkan standar SNI 8675:2018

| Parameter | Variabel | | | Hasil Penelitian | SNI 8675:2018 |
|--------------------------------|-------------|---------------|--------------------------------|------------------|---------------|
| | Perekat (%) | Ayakan (mesh) | Komposisi TKS dan Mesokarp (%) | | |
| Kerapatan (g/cm ³) | 10 | 30 | 70:20 | 0,87 | ≥ 0,8% |
| | | | 50:40 | 1,23 | |
| | | | 40:50 | 0,99 | |
| | | | 30:60 | 0,91 | |
| | 10 | 60 | 70:20 | 0,98 | |
| | | | 50:40 | 1,29 | |
| | | | 40:50 | 0,89 | |
| | | | 30:60 | 0,88 | |
| Kadar Air (%) | 10 | 30 | 70:20 | 3,13 | ≤ 12% |
| | | | 50:40 | 4,08 | |
| | | | 40:50 | 2,95 | |
| | | | 30:60 | 3,11 | |
| | 10 | 60 | 70:20 | 3,17 | |
| | | | 50:40 | 4,23 | |
| | | | 40:50 | 2,75 | |
| | | | 30:60 | 2,85 | |
| Kadar Zat Menguap (%) | 10 | 30 | 70:20 | 61,35 | ≤ 80% |
| | | | 50:40 | 68,95 | |
| | | | 40:50 | 59,02 | |
| | | | 30:60 | 59,74 | |
| | 10 | 60 | 70:20 | 60,94 | |
| | | | 50:40 | 69,17 | |
| | | | 40:50 | 58,31 | |
| | | | 30:60 | 59,68 | |
| Kadar Abu (%) | 10 | 30 | 70:20 | 14,8 | <1,5% |
| | | | 50:40 | 14,09 | |
| | | | 40:50 | 12,5 | |
| | | | 30:60 | 12,74 | |
| | 10 | 60 | 70:20 | 12,9 | |
| | | | 50:40 | 13,5 | |
| | | | 40:50 | 13,07 | |
| | | | 30:60 | 14 | |
| Nilai Kalor (Kcal/g) | 10 | 30 | 70:20 | 4589,65 | ≥ 4000 |
| | | | 50:40 | 4357,96 | |
| | | | 40:50 | 5211,37 | |
| | | | 30:60 | 5057,89 | |
| | 10 | 60 | 70:20 | 4663,92 | |
| | | | 50:40 | 4238,97 | |
| | | | 40:50 | 5239,43 | |
| | | | 30:60 | 5107,54 | |
| Nilai Karbon Terikat (%) | 10 | 30 | 70:20 | 23,85 | ≥ 14% |
| | | | 50:40 | 16,96 | |
| | | | 40:50 | 28,48 | |
| | | | 30:60 | 27,52 | |
| | 10 | 60 | 70:20 | 26,16 | |
| | | | 50:40 | 17,33 | |
| | | | 40:50 | 28,62 | |
| | | | 30:60 | 26,32 | |

Tabel 2. Pengujian kadar air bahan baku

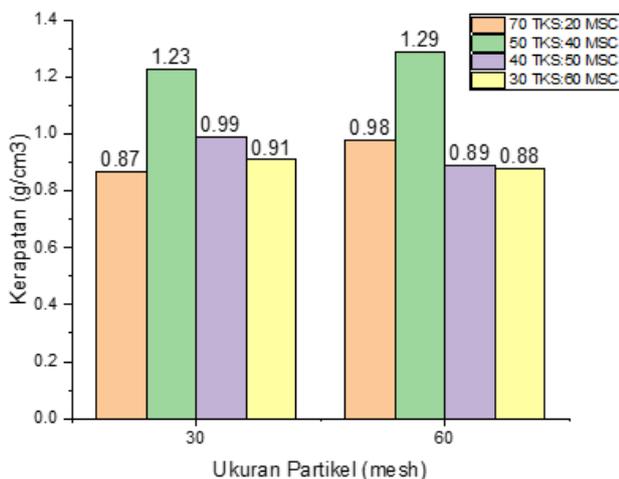
| Bahan Baku | Kadar Air (%) |
|---------------------|---------------|
| Tandan Kosong Sawit | 6,67 |
| Mesokarp | 11,1 |

Berdasarkan Tabel 2, dapat dilihat bahwa kadar air bahan baku untuk tandan kosong sawit adalah 6,67% dan mesokarp 11,1%. Hasil pengujian kadar air bahan baku ini menunjukkan bahwa bahan baku tersebut dapat digunakan untuk menghasilkan biopelet yang memiliki kadar air sesuai dengan ketentuan SNI 8675:2018, yang menetapkan kadar air maksimal 12%

untuk industri dan 10% untuk rumah tangga. Oleh karena itu, bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini layak digunakan untuk menghasilkan biopellet dengan kualitas yang memenuhi standar tersebut.

3.2.2 Kerapatan

Kerapatan menunjukkan perbandingan massa dan volume bahan bakar padat. Kerapatan berpengaruh terhadap kualitas bahan bakar padat, karena kerapatan yang tinggi dapat meningkatkan nilai kalor bahan bakar padat. Besar dan kecilnya kerapatan bahan bakar padat dipengaruhi oleh tekanan, ukuran, dan kehomogenan penyusun bahan bakar padat itu sendiri. Nilai kerapatan yang didapatkan berkisar antara 0,87-1,29 g/cm³. Kerapatan yang didapatkan dalam penelitian ini SNI 8675:2018 yang mensyaratkan kerapatan biopellet lebih dari 0,80 g/cm³. Nilai kerapatan biopellet pada berbagai ukuran serbuk dan komposisi serbuk dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hubungan antara ukuran partikel terhadap kerapatan biopellet pada variasi komposisi bahan baku

Berdasarkan Gambar 3, biopellet dengan komposisi TKS 50% dan mesokarp 40%, menggunakan ayakan 60 mesh, memiliki kerapatan tertinggi sebesar 1,29 g/cm³. Sebaliknya, kerapatan terendah ditemukan pada biopellet dengan TKS 70% dan mesokarp 20%, menggunakan ayakan 30 mesh, dengan nilai sebesar 0,87 g/cm³. Temuan ini konsisten dengan penelitian Wrobel et al. (2018) yang menyatakan bahwa berat jenis bahan baku berpengaruh signifikan terhadap kerapatan biopellet yang dihasilkan.

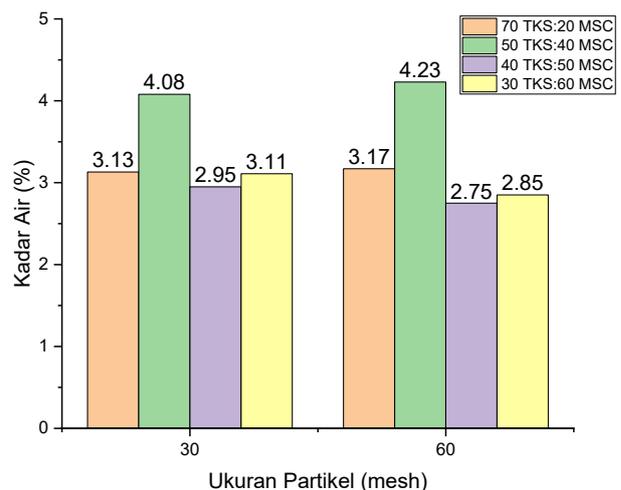
Kerapatan biopellet dipengaruhi oleh dua faktor utama: berat jenis dan ukuran partikel. Berat jenis berhubungan dengan kepadatan senyawa atau bahan penyusun biopellet. Semakin tinggi berat jenisnya, semakin besar kerapatan yang dihasilkan. Di sisi lain, ukuran partikel memengaruhi cara partikel-partikel bahan penyusun saling berinteraksi, dimana semakin kecil ukuran partikel, semakin baik kerapatan yang dapat dicapai karena partikel-partikel yang lebih halus dapat mengisi ruang kosong lebih rapat. Oleh karena itu, baik berat jenis maupun ukuran partikel memiliki pengaruh terhadap kerapatan biopellet, namun

keduanya memengaruhi kerapatan melalui mekanisme yang berbeda.

Kerapatan biopellet dengan ayakan 30 dan 60 mesh mengalami penurunan pada perlakuan TKS 40%: mesokarp 50% dan TKS 30%: mesokarp 60%. Hal ini diduga disebabkan oleh variasi dalam komposisi bahan baku dan tekanan pengepresan yang digunakan. (Pambudi et al., 2018) menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan pencetakan, maka densitas yang dihasilkan akan semakin tinggi. Tekanan yang lebih tinggi menyebabkan partikel bahan baku terdesak untuk mengisi rongga kosong, sehingga mengurangi porositas dan meningkatkan kerapatan. Selain itu, Zulfian et al., (2015) mengemukakan bahwa ketidakmerataan dalam pencampuran perekat dapat menyebabkan biopellet yang dihasilkan tidak seragam, yang berakibat pada kestabilan kadar air biopellet. Ketidakteraturan dalam pencampuran perekat menyebabkan bagian-bagian biopellet yang lebih rapat atau lebih longgar, yang dapat mempengaruhi penguapan air dan akhirnya mempengaruhi kerapatan. Dengan demikian, nilai densitas yang optimal pada biopellet dapat dicapai melalui kombinasi antara tekanan pengepresan yang tinggi, pencampuran bahan baku yang merata, dan penggunaan bahan baku yang memiliki tekstur keras dan padat (Nanda & Fona, 2018).

3.2.3 Kadar air

Kadar air merupakan parameter penting untuk menilai kualitas dan masa simpan biopellet. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar air biopellet berada dalam rentang 2,75–4,23%. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan SNI 8675:2018, yang menetapkan kadar air maksimal sebesar 12%. Perbandingan hasil perhitungan kadar air biopellet ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan ukuran partikel terhadap kadar air biopellet pada variasi komposisi bahan baku

Berdasarkan Gambar 4, biopellet dengan komposisi TKS 50% dan mesokarp 40%, menggunakan ayakan 60 mesh, memiliki kadar air tertinggi sebesar 4,23%. Sebaliknya, kadar air terendah ditemukan pada biopellet dengan komposisi TKS 40% dan mesokarp

60%, menggunakan ayakan 60 mesh, yaitu sebesar 2,75%. Kadar air biopelet dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis bahan baku, jenis perekat, dan waktu pengeringan (Syaiful & Tang, 2020). Menurut Ahmed et al. (2021), ukuran partikel yang lebih kecil dapat memengaruhi kadar air biopelet. Hal ini disebabkan oleh adanya pori-pori yang lebih kecil pada biopelet dengan ukuran partikel yang halus, sehingga kapasitas penyerapan air menurun. Dengan demikian, semakin kecil ukuran partikel bahan baku, semakin rendah kadar air yang dapat ditahan oleh biopelet tersebut.

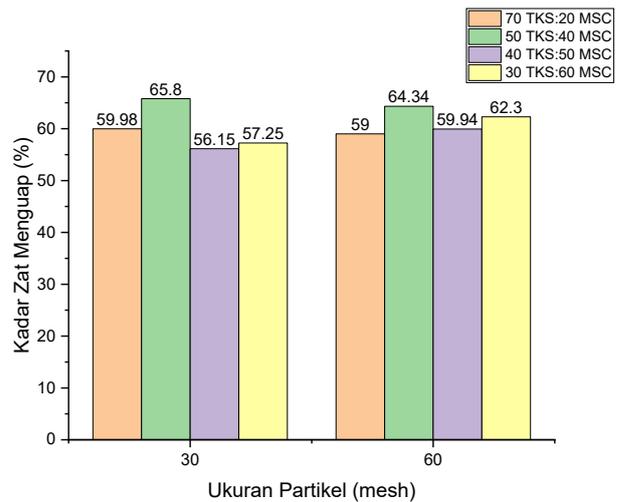
Hasil penelitian ini sejalan dengan pernyataan Ahmed et al. (2021), yaitu pada perlakuan TKS 40%: mesokarp 50% dan TKS 30%: mesokarp 60%, dimana kadar air mengalami penurunan, sementara pada perlakuan TKS 70%: mesokarp 20% dan TKS 50%: mesokarp 40% mengalami kenaikan. Hal ini diduga disebabkan oleh pencampuran air dan bahan baku yang kurang merata serta tekanan alat yang tidak seragam saat proses pencetakan. Pada proses pencetakan, jika penekanan dilakukan secara manual dan tidak menggunakan mesin dengan tekanan yang konsisten, maka hasil pencetakan biopelet dapat memiliki ketidakteraturan pada distribusi tekanan. Ketidakteraturan ini menyebabkan perbedaan kadar air di dalam biopelet karena variasi tekanan yang diterima oleh masing-masing partikel, yang pada gilirannya mempengaruhi kadar air dan kualitas biopelet. Massa biopelet dapat dipengaruhi oleh ketidakseimbangan antara air dan serbuk pada setiap perlakuan, yang dapat menghasilkan fluktuasi kadar air (Damayanti et al., 2017). Menurut Wahyono et al. (2021), hasil cetakan biopelet akan lebih padat, halus, dan seragam apabila tekanan yang diberikan tinggi dan konsisten, karena pori-pori kosong akan terisi oleh partikel biomassa, sehingga molekul air yang berada di dalam pori-pori tersebut akan berkurang.

3.2.4 Kadar zat menguap

Kadar zat menguap merupakan persentase berat yang hilang ketika biopelet dipanaskan tanpa adanya kontak dengan udara luar, sesuai dengan standar SNI 8675:2018. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar zat menguap biopelet berada dalam rentang 56,16–65,8%. Nilai ini memenuhi persyaratan SNI 8675:2018, yang menetapkan kadar zat menguap maksimal sebesar 80%. Perbandingan hasil perhitungan kadar zat menguap biopelet ditampilkan pada Gambar 5.

Berdasarkan Gambar 5, kadar zat menguap terendah terdapat pada perlakuan TKS 40%: mesokarp 50% pada ayakan 30 mesh, yaitu 56,15%, dan tertinggi pada perlakuan TKS 50%: mesokarp 40% pada ayakan 60 mesh, yaitu 64,34%. Pernyataan yang menyebutkan bahwa kadar zat menguap pada perlakuan komposisi setiap percobaan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan ukuran serbuk tidak sejalan dengan hasil kadar air yang didapatkan dalam penelitian ini, di mana kadar air justru mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya ukuran serbuk. Hal ini disebabkan oleh perbedaan sifat fisik dari masing-masing parameter yang diukur. Kadar zat

menguap dipengaruhi oleh bahan baku yang digunakan, sedangkan kadar air lebih terkait dengan proses pengeringan dan kadar kelembaban bahan. Tingginya kadar zat menguap yang ditemukan dalam penelitian ini diduga karena penggunaan bahan baku serbuk dari TKS dan mesokarp yang tidak dikarbonisasi. Proses karbonisasi, yang melibatkan pemanasan bahan pada suhu tinggi dalam kondisi tanpa oksigen, dapat mengurangi kadar zat menguap. Meskipun bahan yang digunakan dalam penelitian ini belum melalui proses karbonisasi, hasil biopelet yang dihasilkan masih memenuhi standar SNI 8675:2018 untuk biopelet.

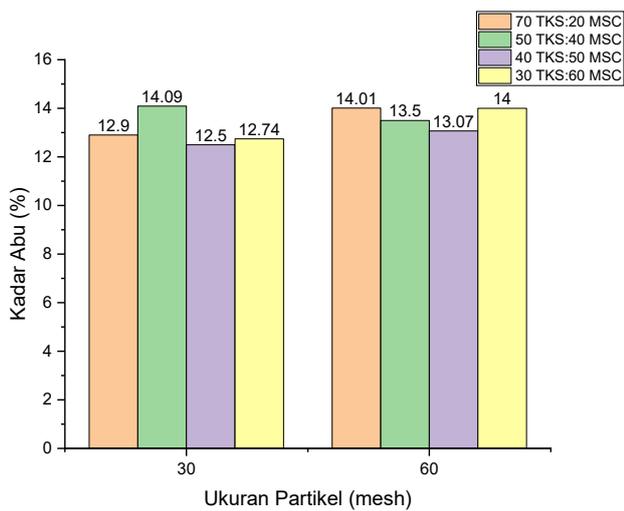


Gambar 5. Hubungan antara ukuran partikel terhadap kadar zat menguap pada variasi komposisi bahan baku

Menurut Plavniece et al. (2022), jenis bahan baku dan proses karbonisasi (suhu dan waktu) merupakan faktor yang mempengaruhi kadar zat menguap. Proses karbonisasi yang tepat dapat mengurangi kadar zat menguap, karena sebagian zat volatil akan menguap dan karbon tetap berada dalam bahan tersebut. Oleh karena itu, meskipun bahan baku tidak dikarbonisasi dalam penelitian ini, produk biopelet yang dihasilkan masih memenuhi ketentuan standar, namun untuk peningkatan kualitas lebih lanjut, karbonisasi dapat dilakukan pada bahan baku untuk mengurangi kadar zat menguap dan meningkatkan kestabilan biopelet.

3.2.5 Kadar abu

Kadar abu merupakan persentase kandungan mineral yang tersisa dari proses pembakaran biopelet, sesuai dengan standar SNI 8675:2018. Abu adalah residu dari pembakaran yang tidak mengandung unsur karbon lagi setelah dibakar pada suhu 750°C. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar abu biopelet berkisar antara 12,5–15,9%. Nilai ini tidak memenuhi persyaratan SNI 8675:2018, yang menetapkan kadar abu maksimal sebesar 1,5%. Perbandingan hasil perhitungan kadar abu biopelet disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan antara ukuran partikel terhadap kadar abu pada variasi komposisi bahan baku

Berdasarkan Gambar 6, kadar abu terendah terdapat pada perlakuan TKS 40%: mesokarp 50% pada ayakan 30 mesh, yaitu 13,5%, dan kadar abu tertinggi terdapat pada perlakuan TKS 70%: mesokarp 20% pada ayakan 60 mesh, yaitu 15,9%. Pada ukuran partikel yang lebih besar, lebih banyak bahan yang tidak terbakar atau sulit terbakar selama proses pembakaran, yang menghasilkan lebih banyak abu. Sebaliknya, pada ukuran partikel yang lebih kecil, proses pembakaran menjadi lebih efisien dan lebih banyak bahan yang terbakar sempurna, sehingga kadar abu yang dihasilkan cenderung lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa ada hubungan terbalik antara ukuran partikel dan kadar abu dalam biopelet. Abu merupakan mineral yang tidak dapat terbakar dan tertinggal setelah pembakaran, yang dapat mengurangi nilai kalor biopelet. Semakin tinggi kadar abu, semakin rendah nilai kalor yang dihasilkan, sehingga dapat mempengaruhi kinerja biopelet sebagai bahan bakar. Sebagai contoh, Ismayana & Afriyanto, (2011) menyatakan bahwa abu yang terkandung dalam bahan bakar padat akan mengurangi nilai kalor dan kualitas bahan bakar tersebut karena abu tidak dapat terbakar dan menurunkan efisiensi energi yang dihasilkan. Dengan demikian, penurunan kadar abu pada biopelet dapat dicapai dengan menggunakan ukuran partikel yang lebih kecil, yang memungkinkan pembakaran lebih efisien dan mengurangi jumlah abu yang terbentuk.

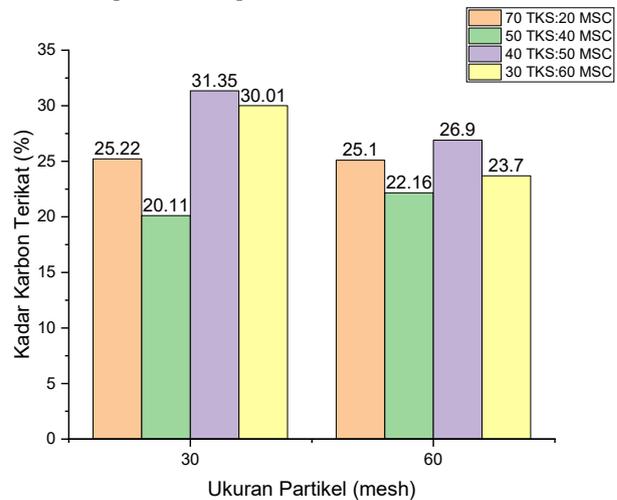
Komposisi bahan juga memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai kadar abu, karena kandungan dari tiap bahan berbeda-beda dan cepat atau lambatnya terbakar menjadi abu juga tergantung dari komposisi bahan penyusun. Komponen utama abu dalam biomassa berupa kalsium, kalium, magnesium dan silika yang berpengaruh terhadap nilai kalor pembakaran (Iwanek et al., 2024).

Untuk mengurangi kadar abu yang lebih tinggi dari standar, disarankan untuk melakukan proses karbonisasi pada bahan baku TKS dan mesokarp sebelum pembuatan biopelet. Karbonisasi dapat membantu mengurangi kadar abu dan meningkatkan

kualitas biopelet. Menjaga konsistensi ukuran partikel selama proses pengayakan dapat mempengaruhi kualitas akhir biopelet. Penggunaan ayakan yang lebih halus atau pengendalian lebih ketat dalam pencampuran bahan baku dan air juga dapat mengurangi kadar abu dan meningkatkan keseragaman produk. Ukuran serbuk (terutama ayakan 60 mesh) mempengaruhi kadar abu dan nilai kalor biopelet. Semakin halus serbuk yang digunakan (ukuran ayakan lebih kecil), semakin baik pembakaran dan semakin rendah kadar abu, yang berkontribusi pada peningkatan nilai kalor. Komposisi bahan baku (TKS dan mesokarp) mempengaruhi kadar air, zat menguap, karbon terikat, dan nilai kalor. Semakin banyak TKS yang digunakan dalam komposisi, kadar karbon terikat cenderung lebih rendah, sementara kadar air dan zat menguap lebih tinggi. Sebaliknya, komposisi yang lebih tinggi mesokarp memberikan kadar karbon terikat yang lebih tinggi dan nilai kalor yang lebih baik.

3.2.6 Kadar karbon terikat

Kadar karbon terikat merupakan sisa karbon dalam biomassa yang tidak termasuk dalam zat menguap maupun abu. Hasil penelitian menunjukkan kadar karbon terikat biopelet berkisar antara 20,11–31,35%. Nilai ini memenuhi standar SNI 8675:2018, yang mensyaratkan kadar karbon terikat minimal sebesar 14%. Perbandingan kadar karbon terikat pada biopelet dengan berbagai ukuran dan komposisi serbuk dapat dilihat pada Gambar 7.



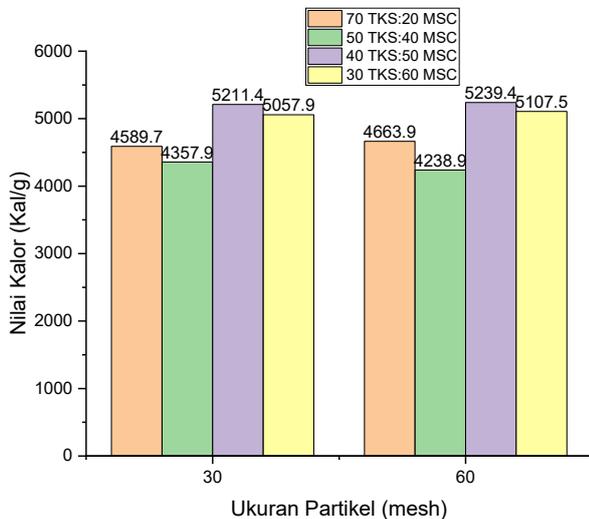
Gambar 7. Hubungan antara ukuran partikel terhadap kadar karbon terikat pada variasi komposisi bahan baku

Berdasarkan Gambar 7, perlakuan dengan komposisi TKS 40% dan mesokarp 50%, menggunakan ayakan 30 mesh, menghasilkan kadar karbon terikat tertinggi sebesar 31,35%. Sebaliknya, kadar karbon terikat terendah sebesar 20,11% ditemukan pada perlakuan dengan komposisi TKS 50% dan mesokarp 40%, menggunakan ayakan 30 mesh. Ukuran partikel berpengaruh signifikan terhadap kadar karbon terikat biopelet.

Penelitian ini menunjukkan bahwa biopellet dengan ukuran partikel lebih kecil, seperti yang dihasilkan melalui ayakan 30 mesh, memiliki kadar karbon terikat yang lebih tinggi. Hal ini terjadi karena ukuran partikel yang lebih kecil memungkinkan distribusi bahan baku yang lebih baik, sehingga karbon terikat lebih maksimal (Nuriana, 2022). Sebaliknya, semakin tinggi kadar zat menguap dan kadar abu, maka kadar karbon terikat pada biopellet akan semakin rendah. Zat menguap dan abu mengurangi konsentrasi karbon yang tertahan dalam partikel biopellet, sehingga menurunkan kadar karbon terikat. Temuan ini sesuai dengan penelitian Damayanti et al., (2021), yang menunjukkan bahwa kadar karbon terikat cenderung menurun seiring dengan peningkatan kadar zat menguap dan abu.

3.2.7 Nilai kalor

Parameter utama untuk menentukan kualitas biopellet dan efisiensi bahan bakar adalah nilai kalor (Marian et al., 2023). Kadar air, kadar zat menguap, kadar abu dan kadar karbon terikat menjadi faktor yang mempengaruhi nilai kalor yang didapatkan. Nilai kalor yang didapatkan pada penelitian ini berkisar antara 4.238,97-5.239,43 kal/g. Nilai kalor yang dihasilkan dalam penelitian ini memenuhi SNI 8675:2018 yang mensyaratkan nilai kalor biopellet minimal 4.000 kal/g. Nilai kalor biopellet pada berbagai ukuran dan komposisi serbuk dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan antara ukuran partikel terhadap nilai kalor pada variasi komposisi bahan baku

Berdasarkan Gambar 8, nilai kalor tertinggi terdapat pada perlakuan TKS 40%: mesokarp 50% pada ayakan 60 mesh yaitu 5239,43 kal/g dan terendah pada perlakuan TKS 50%: mesokarp 40% pada ayakan 30 mesh yaitu 4238,97 kal/g. Semakin tinggi nilai kalor, menunjukkan semakin baiknya kualitas bahan bakar yang dihasilkan (Kwao-Boateng et al., 2024). Nilai kalor pada setiap perlakuan mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya ukuran serbuk, kecuali pada perlakuan TKS 50%: mesokarp 40% pada ayakan 60 mesh yang memiliki nilai kalor terendah. Hal ini diduga

karena pada penelitian ini, perlakuan tersebut memiliki kadar air tertinggi. Kadar air yang tinggi dapat mengurangi nilai kalor biopellet, karena energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air tidak dapat digunakan untuk menghasilkan panas saat pembakaran. Namun, penurunan kerapatan tidak selalu berbanding langsung dengan penurunan nilai kalor. Pada penelitian ini, meskipun ukuran serbuk lebih besar, terdapat peningkatan nilai kalor, kemungkinan besar karena komposisi bahan baku (mesokarp) yang lebih tinggi, yang memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan TKS. Peningkatan biomassa serbuk mesokarp juga dapat berkontribusi pada peningkatan nilai kalor, mengingat bahwa mesokarp memiliki kandungan energi yang lebih tinggi dibandingkan tandan kosong sawit (TKS).

Perlakuan dengan ayakan 60 mesh menghasilkan nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan ayakan 30 mesh, karena kadar abu biopellet yang dihasilkan lebih besar pada ayakan 30 mesh. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kandungan mineral pada bahan baku yang tidak terbakar secara sempurna, sehingga tertinggal sebagai abu dalam biopellet. Mineral yang terdapat dalam bahan baku dapat terperangkap dalam biopellet, dan pada ayakan yang lebih besar (30 mesh), partikel yang lebih besar memiliki potensi lebih tinggi untuk mengandung mineral yang tidak terbakar sempurna.

Sebaliknya, partikel yang lebih kecil dari ayakan 60 mesh memungkinkan distribusi yang lebih merata, sehingga mengurangi kadar mineral yang tertahan dalam biopellet dan menurunkan kadar abu. Kandungan mineral yang tinggi dalam biopellet kemungkinan juga disebabkan oleh kadar air yang terlalu tinggi pada bahan baku sebelum proses pembuatan biopellet (Damayanti et al., 2017). Oleh karena itu, penggunaan bahan baku dengan kadar air yang lebih rendah selama proses produksi biopellet dapat membantu meminimalkan kontaminasi mineral dalam produk akhir.

4. KESIMPULAN

Karakteristik biopellet yang dihasilkan dari tandan kosong kelapa sawit (TKS) dan mesokarp menunjukkan rentang nilai sebagai berikut: kerapatan 0,87-1,29 g/cm³, kadar air 2,75-4,23%, kadar zat menguap 56,16-65,8%, kadar abu 12,5-15,9%, kadar karbon terikat 20,11-31,35%, dan nilai kalor 4238,97-5239,43 kal/g. Seluruh parameter pengujian sudah memenuhi SNI 8675:2018, kecuali pada uji kadar abu yang masih sedikit lebih tinggi dari batas yang ditetapkan oleh standar. Perlakuan dengan ukuran serbuk 60 mesh dan komposisi TKS 40% : mesokarp 50% menghasilkan kualitas biopellet terbaik yang sesuai dengan SNI 8675:2018 untuk sebagian besar parameter, kecuali pada kadar abu. Nilai karakteristik biopellet pada perlakuan ini adalah sebagai berikut: kerapatan 0,89 g/cm³, kadar air 2,75%, kadar zat menguap 58,31%, kadar abu 13,07%, kadar karbon terikat 28,62%, dan nilai kalor 5239,43 kal/g. Variasi dalam komposisi dan ukuran bahan sangat berpengaruh terhadap kualitas biopellet yang

dihasilkan. Peningkatan kualitas biopellet dapat dicapai dengan memodifikasi komposisi bahan baku dan memperhatikan ukuran serbuk yang lebih halus untuk meningkatkan performa pembakaran dan mengurangi kadar abu.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, I., Ali, A., Ali, B., Hassan, M., Hussain, S., Hashmi, H., Ali, Z., & Soomro, A. (2021). Pelletization of biomass feedstocks: Effect of moisture content, particle size and a binder on characteristics of biomass Pellets. *BioEnergy Research*, 1–29. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-163994/v1>
- Amri, I., Muchlis, T., & Helwani, Z. (2021). Upgrading karakteristik biopellet tandan kosong sawit dengan penambahan oil sludge sebagai co-firing. *Journal of the Bioprocess, Chemical, and Environmental Engineering Science*, 1(1), 2021.
- Brunerová, A., Müller, M., Šleger, V., Ambarita, H., & Valášek, P. (2018). Bio-pellet fuel from oil palm empty fruit bunches (EFB): Using European standards for quality testing. *Sustainability (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/su10124443>
- Damayanti, A., Musfiroh, R., & Andayani, N. F. (2021). The effect of tapioca flour adhesives to the biopellet characteristics of rice husk waste as renewable energy. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 700(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/700/1/012028>
- Damayanti, R., Lusiana, N., & Prasetyo, J. (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). <https://doi.org/10.24198/jt.vol11n1.6>
- Haryanto, A., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., & Hidayat, W. (2021). Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: potential and challenges*. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8(1), 33–42. <http://www.procedia-esem.eu>
- Ismayana, A., & Afriyanto, M. R. (2011). The effects of adhesive type and concentration in the manufacturing of filter cake briquettes as an alternative fuel. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 21(3).
- Iwanek, E. M., Nierzaba, U., Pietras, M., Marciniak, A., Głuski, G., Hupka, J., Szymajda, M., Kamiński, J., Szerewicz, C., Goździk, A., & Kirk, D. W. (2024). Possible options for utilization of EU biomass waste: Pyrolysis char, calorific value and ash content. *Materials*, 17(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma17010226>
- Kurniawan, E., Ginting, Z., & Dewi, R. (2022). Pemanfaatan limbah serabut kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) sebagai sumber energi alternatif dalam pembuatan biopellet. *Chemical Engineering Journal Storage*, 2(2), 11–24.
- Kwao-Boateng, E., Ankudey, E. G., Darkwah, L., & Danquah, K. O. (2024). Assessment of diesel fuel quality. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24733>
- Mardikatama, B. C., Wijayanto, D. S., & Saputra, T. W. (2024). Pyrolysis of biomass mixture of coconut fiber and rice husk waste with polypropylene plastic. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 13(4), 1000–1008. <https://doi.org/10.11591/ijaas.v13.i4.pp1000-1008>
- Marian, G., Gelu, I., Gudima, A., Nazar, B., Istrate, B., Banari, A., Pavlenco, A., & Daraduda, N. (2023). Calorific value of pellets produced from raw material collected from both sides of the river prut. *Journal of Engineering Science*, 29(4), 126–137. [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2022.29\(4\).10](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2022.29(4).10)
- Mawardi, I., Razali, M., Zuhaimi, Z., Ibrahim, A., Akadir, Z., Razak, H., Nurlaili, N., Ginting, A., Ismy, A. S., & Syarif, J. (2023). Characteristics of hybrid biopellet based on oil palm wood and natural activated charcoal as a renewable alternative energy source. *Journal of Ecological Engineering*, 24(9), 80–91. <https://doi.org/10.12911/22998993/168412>
- Munawar, S. S., & Subiyanto, B. (2014). Characterization of biomass pellet made from solid waste oil palm industry. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.042>
- Nanda, R. A., & Fona, Z. (2018). Analisis mutu briket arang cangkang kopi, cangkang kemiri dan tempurung kelapa ditinjau dari kadar perekat kanji. In *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe (Vol. 2, No. 1)*.
- Nurhilal, O., & Sri, S. (2018). Pengaruh komposisi campuran sabut dan tempurung kelapa terhadap nilai kalor biobriket dengan perekat molase. *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, 02(01), 8–14.
- Nuriana, W. (2022). Pengaruh variasi ukuran partikel bahan biopellet terhadap laju pembakaran dan kerapatan massa pada limbah kayu mahoni. *Jurnal Agri-Tek: Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Eksakta*, 23(1), 11-15.
- Pambudi, F. K., Nuriana, W., & Hantarum, H. (2018). Pengaruh tekanan terhadap kerapatan, kadar air dan laju pembakaran pada biobriket limbah kayu sengon. In *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan VI 2018*, 547–553.
- Plavniece, A., Dobeles, G., Volperts, A., & Zhurins, A. (2022). Hydrothermal carbonization vs. pyrolysis: effect on the porosity of the activated carbon materials. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/su142315982>
- Santo, H., Johan, V. S., Zalfiatri, Y., & Nopiani, Y. (2023). Karakteristik fisikokimia briket arang batang kelapa sawit dengan penambahan arang tempurung kelapa. *Sagu*, 22(1), 32-37.
- Syaiful, A. Z., & Tang, M. (2020). Pembuatan briket arang dari tempurung kelapa dengan metode pirolisis. *Saintis*, 1(2).
- Ulfah, D., Thamrin, G. A., & Rahmiyati, R. (2021). The quality of biopellet from rice husk waste (*Oryza sativa*) as a solution for crisis energy. *Jurnal Hutan Tropis*, 9(2).

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.20527/jht.v9i2.11293>

- Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Pratiwi, W. Z., & Dianratri, I. (2021). "Biopellet" as one of future promising biomass-based renewable energy: a Review. E3S Web of Conferences, 317. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131704029>
- Wrobel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M., & Knapczyk, A. (2018). Impact of raw material properties and agglomeration pressure on selected parameters of granulates obtained from willow and black locust biomass. *Engineering for Rural Development*, 17, 1933–1938. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N542>
- Zulfian, Z., Farah, D., Dina, S., & Emi, R. (2015). The quality of biopellet from oil palm trunk waste with different size of particle and adhesives. *Jurnal Hutan Lestari*, 3(2), 208–216.