

# Konversi Limbah Biomassa Tandan Kosong Sawit menjadi Energi Panas

Erdiwansyah<sup>1\*</sup>, Muhtadin<sup>2</sup>, Asri Gani<sup>3</sup>, Muhammad Faisal<sup>4</sup>, Muhammad Nizar<sup>5</sup>, Yeggi Darnas<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh, Indonesia

<sup>2,4</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Abulyatama Aceh, Aceh Besar, Indonesia

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Kimia, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

<sup>5</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh, Indonesia

<sup>6</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, Banda Aceh, Indonesia

\*Koresponden email: erdiwansyah5@gmail.com

Diterima: 20 Desember 2023

Disetujui: 30 Desember 2023

## Abstract

Biomass waste from palm oil mill processing in Indonesia, especially on the island of Sumatra one of which is Aceh Province, is currently quite abundant and has not been managed optimally. This biomass waste can be converted into solid energy, which can be used as energy for biomass power plants. The aim of this research is specifically to convert biomass waste into solid energy. This research applies Simultaneous compression with heating as a fuel production method. The biomass waste used as solid fuel production material is empty palm oil bunches. The results of the fuel production process based on palm oil biomass waste show that the energy value reaches 26.80 MJ/kg. The carbon content in the produced fuel reaches 47.56%, with a low ash content of 6.70%. Calculations of the density of biomass-based fuel before and after production show an average of 1.42 grams/cm<sup>3</sup>. The results of tests carried out on fuel produced using palm oil biomass waste show high energy potential that can be used to reduce dependence on the use of coal.

**Keywords:** *energy conversion, empty palm fruit bunches, biomass waste, energy value, renewable energy*

## Abstrak

Limbah biomassa hasil pengolahan pabrik kelapa sawit di Indonesia, terutama di Pulau Sumatera dan salah satunya Provinsi Aceh saat ini cukup melimpah dan belum dilakukan pengelolaan secara maksimal. Limbah biomassa tersebut dapat dikonversi menjadi energi padat yang dapat digunakan sebagai energi pembangkit listrik tenaga biomassa. Tujuan dari penelitian ini secara khusus untuk mengonversi limbah biomassa menjadi energi padat. Pengompresian secara bersamaan dengan pemanasan diterapkan sebagai metode produksi bahan bakar dalam penelitian ini. Limbah biomassa yang digunakan sebagai material produksi bahan bakar padat ini adalah tandan kosong kelapa sawit. Berdasarkan hasil proses produksi bahan bakar berbasis limbah biomassa kelapa sawit menunjukkan bahwa nilai energinya mencapai 26,80 MJ/kg. Kandungan karbon yang terdapat dalam bahan bakar hasil produksi mencapai 47,56% dengan kandungan abu yang rendah 6,70%. Densitas bahan bakar berbasis biomassa dari hasil perhitungan sebelum dan sesudah produksi rata-rata mencapai 1,42 gram/cm<sup>3</sup>. Dari hasil pengujian yang dilakukan bahan bakar hasil produksi dengan limbah biomassa kelapa sawit menunjukkan potensi energi yang tinggi yang dapat digunakan dalam mengurangi ketergantungan penggunaan batu bara.

**Kata Kunci:** *konversi energi, tandan kosong sawit, limbah biomassa, nilai energi, energi terbarukan*

## 1. Pendahuluan

Limbah biomassa hasil pengolahan pabrik kelapa sawit di beberapa industri keberadaannya saat ini telah mengkhawatirkan terhadap kesehatan masyarakat melalui pencemaran udara terutama penduduk yang berdekatan langsung dengan pabrik kelapa sawit. Ketersediaan limbah biomassa di pabrik kelapa sawit saat ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Untuk mengurangi polusi limbah biomassa ini dapat dilakukan melalui konversi biomassa menjadi energi. Produksi energi dari limbah biomassa selama ini telah banyak dilaporkan di dalam publikasi [1]–[3]. Sementara ketersediaan limbah biomassa yang dapat digunakan sebagai bahan material produksi bahan bakar padat khususnya di Indonesia juga sangat melimpah [4]–[7]. Sedangkan kebijakan dan promosi dari pemerintah terkait penggunaan energi terbarukan juga telah diterapkan [8]–[10]. Pengembangan teknologi energi terbarukan di seluruh dunia saat ini telah mulai menarik perhatian kalangan peneliti dan industri.

Teknologi konversi berbagai limbah biomassa menjadi energi terbarukan saat ini telah banyak dikembangkan di beberapa negara berkembang [11]–[13]. Pengembangan energi terbarukan yang dilakukan di negara China untuk mengupayakan inovasi, dan mendorong transisi energi yang adil dan pembangunan berkelanjutan [14]. Hasil dari upaya yang dilakukan menunjukkan bahwa teknologi yang dikembangkan memiliki efektif berkontribusi terhadap keadilan distributif, keadilan prosedural, keadilan pengakuan, dan keadilan restoratif dan secara umum berdampak positif terhadap keadilan energi. Pengembangan minyak impor dengan pengembangan teknologi energi terbarukan banyak memberikan manfaat di beberapa negara terutama ketahanan energi nasional [15]. Inovasi teknologi berdampak rendah terhadap energi terbarukan ketika inovasi teknologi berada di bawah nilai ambang batas. Namun, inovasi teknologi mempunyai dampak positif yang kuat terhadap energi terbarukan ketika nilai ambang batas berada di atas karena perluasan belanja energi dan teknologi.

Pembangkitan energi terbarukan di lokasi dan rasio penghematan terhadap investasi sekaligus meminimalkan biaya pembangunan dengan mengoptimalkan desain skema bangunan dan energi terbarukan [16]. Penerapan energi terbarukan juga dapat dimanfaatkan untuk penangkapan karbon dan pajak karbon yang sangat baik dengan tingkat keberhasilan tinggi [17]. Pengembangan dan inovasi teknologi energi terbarukan juga sangat penting untuk memajukan transisi energi secara global [18]. Hasil analisis menunjukkan bahwa kebijakan insentif ekonomi dan panduan kebijakan demonstratif dapat meningkatkan kualitas paten. Namun, dampaknya bervariasi antar jenis dan wilayah teknologi energi itu sendiri. Kebijakan teknologi energi terbarukan melalui inovasi teknologi memiliki dampak terbatas terhadap inovasi penyimpanan energi [19]. Pengembangan teknologi energi terbarukan dengan berbagai metode juga telah banyak dikembangkan, tetapi belum mencapai hasil yang maksimal.

Metodologi optimasi untuk beberapa tujuan melalui sintesis teknologi baru biomassa-ke-cair yang diintensifkan dengan dampak dan biaya lingkungan yang lebih rendah, serta keamanan dan efisiensi proses yang lebih tinggi telah dibahas [20]. Metodologi pengoptimalan baru diterapkan pada dua konfigurasi proses yang disintesis dalam penelitian sebelumnya [21]. Di mana evaluasi superstruktur pemrosesan biomassa-ke-cair dilakukan dalam batasan ekonomi dan skenario profil produk yang berbeda. Metode superkritis, gasifikasi, pencairan dan cairan pirolisis, proses biomassa menjadi cair dengan menggunakan bahan lignoselulosa yang murah, dapat menghasilkan produk seperti fosil berkualitas tinggi bahan bakar [22]. Metode transformasi foto biomassa menjadi biofuel yang diusulkan bertujuan untuk memandu pengembangan produksi biofuel lebih lanjut juga telah dilaporkan [23]. Selain itu, metode konversi termokimia biomassa menjadi energi memiliki potensi yang cukup baik dalam memenuhi ketersediaan bahan bakar secara global [24]. Telah banyak metode konversi limbah biomassa menjadi energi yang telah dilaporkan diberbagai publikasi dan pengembangan berbagai inovasi untuk pengembangan energi terbarukan juga telah banyak dilakukan. Namun, sejauh ini metode secara langsung pemanasan dan pengepresan limbah biomassa mentah menjadi energi padat belum banyak dijelaskan dalam literatur.

Konversi limbah biomassa menjadi energi merupakan salah satu metode untuk mengurangi pencemaran udara yang bersumber dari limbah pabrik kelapa sawit. Produksi bahan bakar padat berbasis limbah biomassa tandan kosong sawit dengan pemanasan dan pengepresan diterapkan dalam penelitian ini. Analisis nilai energi dalam bahan bakar dilakukan dengan menggunakan *Thermogravimetry analysis* (TGA). Sementara untuk perhitungan densitas bahan bakar dilakukan penimbangan sampel sebelum dan sesudah produksi.

## 2. Metode Penelitian

Untuk mengonversi limbah biomassa Tandan Kosong Sawit (TKS) menjadi energi panas, berikut adalah metode analisis dan material yang dapat digunakan:

### 2.1 Karakterisasi Bahan Baku (TKS)

- Analisis komposisi kimia (kandungan air, abu, volatile matter, dan karbon) menggunakan teknik seperti *Proximate Analysis* dan *Ultimate Analysis*.
- Penentuan nilai kalor (*heating value*) untuk mengetahui potensi energi dari TKS.

### 2.2 Pengolahan Awal TKS

- Pengeringan TKS untuk mengurangi kandungan air dan meningkatkan efisiensi konversi.
- Penggilingan atau penghancuran TKS untuk memperkecil ukuran dan meningkatkan luas permukaan.

### 2.3 Proses Konversi

- Pembakaran TKS:** Menggunakan tungku atau boiler untuk membakar TKS dan menghasilkan energi panas.

- b. **Gasifikasi:** Mengonversi TKS menjadi gas sintetis dengan menggunakan oksigen dan uap air dalam kondisi oksidasi terbatas.
- c. **Pirolisis:** Menguraikan TKS dalam kondisi tanpa oksigen untuk menghasilkan biochar, bio-oli, dan gas.

#### 2.4 Evaluasi Efisiensi

- a. Mengukur efisiensi konversi energi dari TKS menjadi energi panas.
- b. Membandingkan performa berbagai metode konversi (pembakaran, gasifikasi, pirolisis) dari segi efisiensi dan emisi.

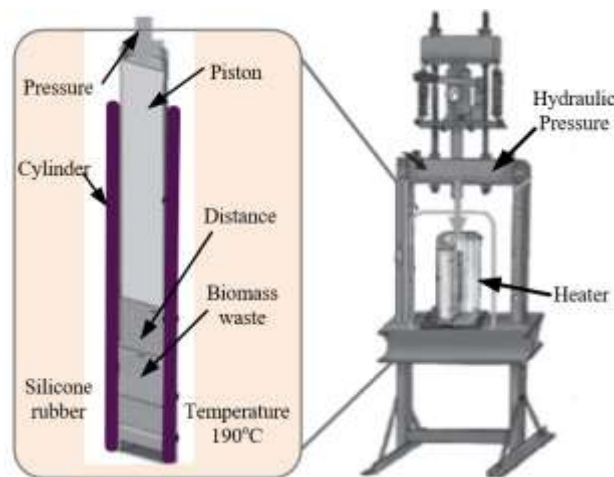
Material dan bahan baku konversi limbah biomassa-energi panas yang digunakan dalam penelitian ini limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sisa pengolahan pabrik kelapa sawit. Limbah TKKS ini dikumpulkan dari pabrik kelapa sawit dan seterusnya dikeringkan sebelum digunakan. Selanjutnya, TKKS yang telah kering dipotong kecil-kecil dan kemudian dihaluskan menggunakan mesin penepung. Limbah biomassa TKKS yang digunakan baik sebelum dan setelah dihaluskan sebagaimana disajikan pada **Gambar 1**.



1) Tandan Buah Segar; 2) TKKS Kring; 3) Proses Pematangan TKKS; 4) TKKS setelah di Kecilkan; 5) Proses Penggilingan TKKS; dan 6) TKKS setelah Penggilingan.

**Gambar 1.** Limbah Biomassa TKKS

Konversi limbah biomassa menjadi energi panas yang diterapkan dalam penelitian ini menggunakan metode langsung yaitu pemanasan dan pengepresan secara bersamaan. Proses pembuatan bahan bakar padat melalui pemanasan dan pengepresan sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 2**. Proses pengepresan menggunakan tekanan hingga 22 MPa dan tingkat temperatur 150°C hingga 190°C. Ukuran sampel bahan bakar yang dibuat dalam penelitian ini masing-masing diameter 12mm x 12mm dan 20mm x 20mm.



**Gambar 2.** Skematik Diagram Hydraulic Press

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis yang diperoleh dalam penelitian ini diantaranya adalah sifat fisik kimia proksimat, ultimat dan lignoselulosa sebagaimana yang disajikan pada **Tabel 1**. Selain itu, hasil analisis dari Thermogravimetric untuk perbedaan tingkat penurunan kandungan air dari sampel yang diuji ditampilkan pada **Gambar 3**. Sementara untuk hasil analisis morfologi permukaan dari sampel yang berbeda disajikan pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**. Hasil analisis yang diperoleh dari penelitian ini diperoleh dari bahan mentah dan hasil produksi bahan bakar bio-coke berbasis limbah padat kelapa sawit. Berdasarkan hasil analisis dapat dilaporkan bahwa kadar air dalam sampel menunjukkan penurunan ketika produksi bio-coke dengan temperatur tinggi. Penurunan kadar air dalam bio-coke dengan temperatur 190°C sebesar 2,18%

dari bio-coke 150°C dan 3,08% daripada bahan mentah TKKS. Kadar abu yang dicatat pada bio-coke 190°C lebih rendah dibandingkan bio-coke 150°C, tetapi kadar abu yang dicatat dari bahan mentah TKKS sedikit lebih rendah. Karbon tetap yang dicatat dari bio-coke sedikit lebih tinggi dibandingkan TKKS mentah. Namun, material yang mudah menguap dari TKKS mentah sedikit lebih tinggi dibandingkan bio-coke berdasarkan hasil analisis proksimat sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 1**.

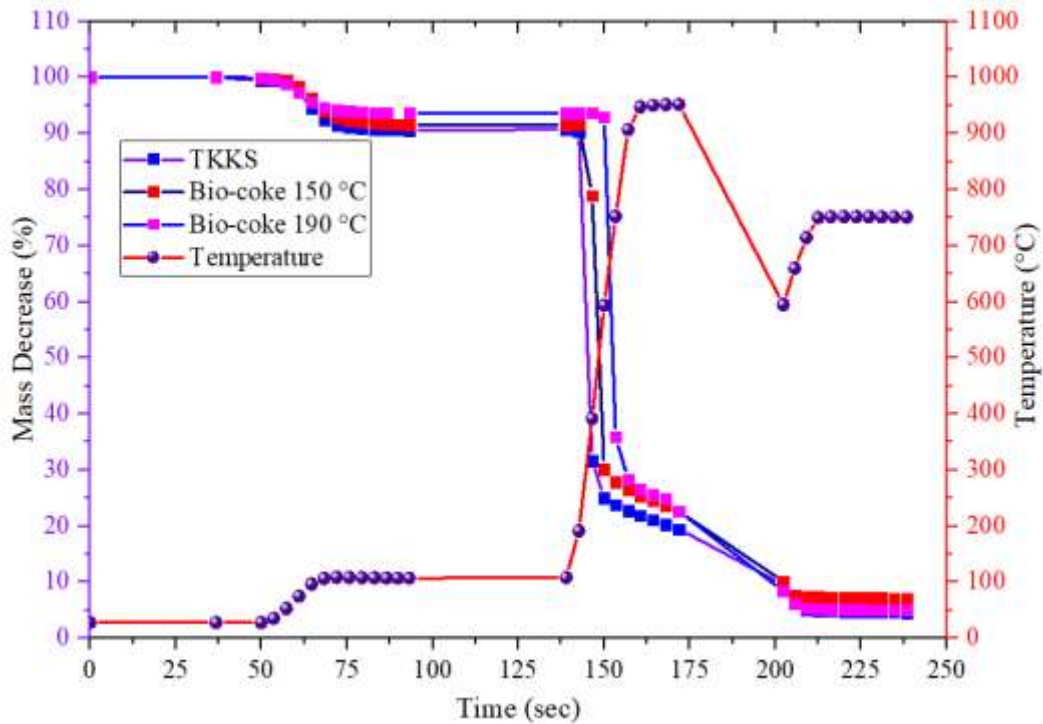
**Tabel 1.** Analisis Proksimat dan Ultimat Antara Bahan Mentah TKKS dan Bio-coke Berbasis TKKS

Jenis Sampel	Kadar Air	Bahan Mudah Menguap	Karbon Tetap	Abu
<b>Analisis Proksimat</b>				
Bahan Mentah TKKS	9,34%	71,20%	14,76%	4,70%
Bio-coke TKKS 150°C	8,44%	68,96%	15,33%	7,27%
Bio-coke TKKS 190°C	6,26%	71,11%	17,53%	5,09%
<b>Analisis Ultimat</b>				
	Karbon	Hidrogen	Nitrogen	Oksigen
Bahan Mentah TKKS	43.70%	6.37%	0.06%	47.69%
Bio-coke TKKS 150°C	47.85%	5.45%	0.06%	46.51%
Bio-coke TKKS 190°C	45.87%	6.01%	0.06%	47.61%
	Lignin	Selulosa	Hemiselulosa	
Bahan Mentah TKKS	53.18%	37.34%	9.48%	
Bio-coke TKKS 150°C	65.22%	27.28%	7.50%	
Bio-coke TKKS 190°C	70.25%	23.40%	6.35%	

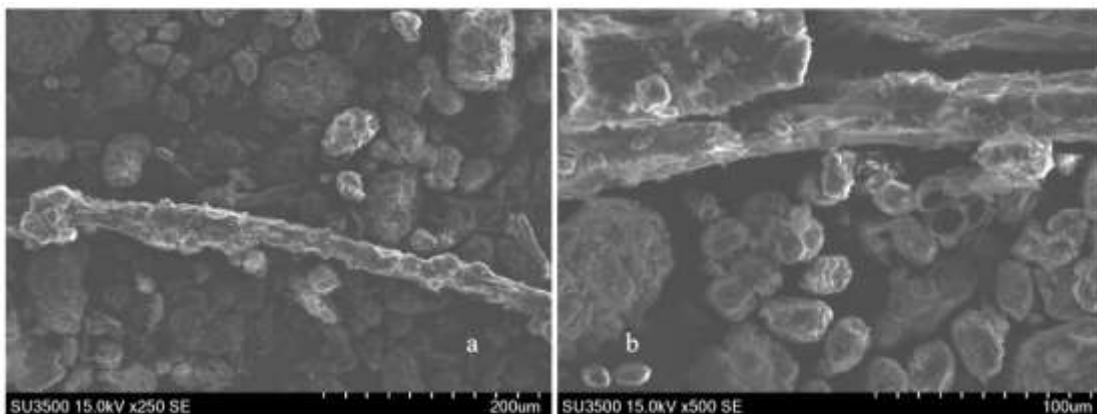
Hasil analisis ultimat dari ketiga sampel yang diuji dapat dilaporkan bahwa kandungan karbon yang terdapat dalam bio-coke lebih tinggi dibandingkan TKKS mentah. Sementara itu, kandungan oksigen dan nitrogen tidak mengalami perubahan secara signifikan. Sedangkan untuk hidrogen dari bio-coke sedikit mengalami penurunan daripada TKKS mentah sebagaimana disajikan pada **Tabel 1**. Hasil analisis lignoselulosa menunjukkan bahwa kandungan lignin dalam bio-coke mengalami peningkatan cukup signifikan dibandingkan TKKS mentah. Sementara untuk kandungan selulosa dan hemiselulosa menurun seiring meningkatnya temperatur pada saat produksi bio-coke sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 1**.

Berdasarkan hasil analisis fisik kimia yang dilakukan pada sampel uji menunjukkan bahwa potensi energi yang terdapat dalam limbah padat tandan kosong kelapa sawit cukup tinggi jika dilakukan pengelolaan dan pemanfaatan yang lebih baik. Selain itu, pemanfaatan limbah padat tandan kosong kelapa sawit ini juga dapat menambah nilai ekonomi bagi masyarakat terutama disekitar pabrik kelapa sawit.

Hasil eksperimen melalui *Thermogravimetric Analysis* yang diuji pada tiga sampel yang berbeda menunjukkan bahwa kandungan air atau berat sampel terjadi penurunan cukup signifikan seiring meningkatnya temperatur. Kandungan air yang terdapat pada TKKS mentah menunjukkan lebih banyak menguap dibandingkan bio-coke sebagaimana disajikan pada **Gambar 3**. Kandungan air yang terdapat dalam sampel bio-coke sedikit lebih rendah karena telah banyak menguap atau hilang pada saat produksi. Sementara kandungan air yang terdapat dalam TKKS mentah lebih banyak karena hanya sedikit yang hilang pada saat pengeringan. Dari hasil analisis melalui *Thermogravimetric* dapat disampaikan bahwa bio-coke yang diproduksi memiliki nilai energi tinggi dan hampir menyamai dengan batubara sehingga bahan bakar bio-coke dari limbah pada kelapa sawit dapat dijadikan sebagai energi alternatif pengganti fosil.

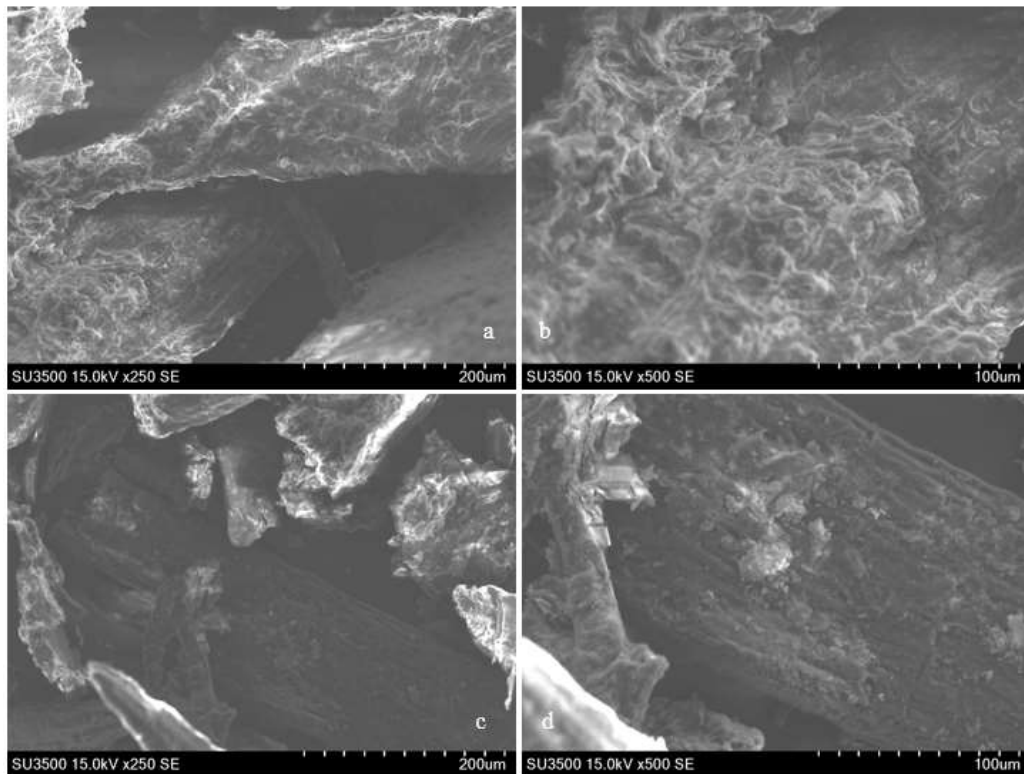


**Gambar 3.** Grafik Hasil Analisis TGA Antara Bahan Mentah TKKS dan Bio-coke Berbasis TKKS



**Gambar 4.** Morfologi permukaan Bahan Mentah TKKS (a) SE 200um dan (b) SE 100um

Pengambilan citra dilakukan dengan parameter "SE 200um dan SE 100um" pada SEM. EDS digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur komposisi unsur pada sampel. Berdasarkan hasil analisis SEM-EDS bahan mentah TKKS dapat disampaikan bahwa pada kondisi "SE 200um", citra menunjukkan resolusi yang lebih rendah, cakupan area yang lebih besar. Sebaliknya, pada kondisi "SE 100um", resolusi lebih tinggi namun area cakupannya lebih kecil sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4**. Analisis EDS pada kedua kondisi mengungkapkan perbedaan dalam distribusi unsur pada mikro-skala. Komposisi unsur dengan "SE 200um", teramati adanya distribusi unsur yang lebih homogen di seluruh area citra baik hasil yang ditemukan pada bahan mentah TKKS maupun dalam bio-coke. Pada "SE 100um", detail lebih jelas terlihat, mengungkapkan variasi komposisi yang mungkin tidak terdeteksi pada resolusi yang lebih rendah. Penggunaan "SE 200um" cocok untuk analisis komposisi secara umum, sementara "SE 100um" lebih ideal untuk mendapatkan informasi detail pada tingkat mikro-skala. Hasil ini menunjukkan pentingnya pemilihan kondisi SEM-EDS yang sesuai dengan tujuan analisis.



**Gambar 5.** Morfologi permukaan dari Bio-coke Berbasis TKKS dengan Temperatur 150°C dan 190°C ((a) SE 200um TKKS; (b) SE 100um TKKS; (c) SE 200um Bio-coke; (d) SE 100um Bio-coke)

Hasil analisis SEM-EDS yang dilakukan dengan menggunakan sampel biocoque dengan temperatur 150°C dan 190°C disajikan dalam **Gambar 5**. Pada kondisi "SE 200um", citra menunjukkan struktur morfologi bahan bakar padat limbah kelapa sawit dengan resolusi menengah, memperlihatkan butiran-butiran dan permukaan sampel dengan cakupan area yang lebih luas. Pada kondisi "SE 100um", resolusi tinggi memberikan detail yang lebih baik terhadap struktur mikroskopis, memungkinkan pengamatan lebih rinci pada permukaan sampel. Sementara komposisi unsur EDS pada "SE 200um" mengindikasikan distribusi unsur dengan tingkat homogenitas yang dapat memberikan informasi tentang komposisi umum sampel. Pada "SE 100um", analisis komposisi unsur mengungkapkan variasi yang lebih detail, terutama pada elemen-elemen minor yang mungkin memiliki peran penting dalam karakteristik bahan bakar bio-coke. Pemilihan kondisi pengambilan citra dalam SEM-EDS memberikan informasi yang berbeda pada berbagai tingkatan resolusi. Distribusi unsur yang teramati pada "SE 100um" dapat memberikan wawasan lebih mendalam terkait kandungan dan karakteristik bahan bakar padat limbah kelapa sawit.

#### 4. Kesimpulan

Penggunaan limbah biomassa, khususnya Tandan Kosong Sawit (TKS), sebagai sumber energi panas melalui proses konversi merupakan langkah yang menjanjikan dalam mendukung keberlanjutan energi. Proses ini tidak hanya mengelola limbah industri kelapa sawit secara efisien tetapi juga menyumbang pada diversifikasi sumber energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Konversi limbah biomassa menjadi energi panas dapat memainkan peran penting dalam mencapai target energi terbarukan serta mengurangi dampak lingkungan dari pembakaran limbah. Dengan adopsi teknologi yang tepat, perubahan ini dapat memberikan solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan sambil meningkatkan efisiensi dan produktivitas dalam industri kelapa sawit. Gabungan antara "SE 200um dan SE 100um" dalam analisis SEM-EDS menyediakan pandangan yang komprehensif terhadap struktur dan komposisi unsur pada bahan bakar padat limbah kelapa sawit. Pemahaman yang mendalam ini dapat memberikan kontribusi pada pengembangan dan peningkatan efisiensi pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial berupa hibah penelitian dari Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) dengan Nomor Kontrak (PRJ-374/DPKS/2022, PRJ-17/DPKS/2023).

## 6. Referensi

- [1] A. Gani *et al.*, “Proximate and ultimate analysis of corncob biomass waste as raw material for biocoke fuel production,” *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 8, p. 100525, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100525>.
- [2] A. Gani *et al.*, “Comparative analysis of HHV and LHV values of biocoke fuel from palm oil mill solid waste,” *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 9, p. 100581, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100581>.
- [3] A. Gani, E. Erdiwansyah, E. Munawar, M. Faisal, and M. Reza, “Pengaruh Pemberian Tekanan dan Pemanasan Terhadap Densitas Bahan Bakar (Bio-Coke) Berbasis Biomassa Bonggol Jagung,” *J. Serambi Eng.*, vol. 8, no. 3, 2023, doi: <https://doi.org/10.32672/jse.v8i3.6101>.
- [4] Erdiwansyah, R. Mamat, M. S. M. Sani, and K. Sudhakar, “Renewable energy in Southeast Asia: Policies and recommendations,” *Sci. Total Environ.*, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.273>.
- [5] E. Erdiwansyah *et al.*, “Investigation of availability, demand, targets, and development of renewable energy in 2017–2050: a case study in Indonesia,” *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 8, pp. 1–17, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00391-4>.
- [6] Erdiwansyah, Mahidin, R. Mamat, M. S. M. Sani, F. Khoerunnisa, and A. Kadarohman, “Target and demand for renewable energy across 10 ASEAN countries by 2040,” *Electr. J.*, vol. 32, no. 10, p. 106670, Dec. 2019, doi: [10.1016/J.TEJ.2019.106670](https://doi.org/10.1016/J.TEJ.2019.106670).
- [7] E. Erdiwansyah *et al.*, “Biomass and wind energy as sources of renewable energy for a more sustainable environment in Indonesia: A review,” *Arch. Environ. Prot.*, vol. 48, no. 3, pp. 57–69, 2022, doi: [10.24425/aep.2022.142690](https://doi.org/10.24425/aep.2022.142690).
- [8] Erdiwansyah, A. Gani, N. MH, R. Mamat, and R. E. Sarjono, “Policies and laws in the application of renewable energy Indonesia: A reviews,” *AIMS Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 23–44, 2022, doi: [10.3934/energy.2022002](https://doi.org/10.3934/energy.2022002).
- [9] M. Azhar and D. A. Satriawan, “Implementasi kebijakan energi baru dan energi terbarukan dalam rangka ketahanan energi nasional,” *Adm. Law Gov. J.*, vol. 1, no. 4, pp. 398–412, 2018.
- [10] S. A. Arsita, G. E. Saputro, and S. Susanto, “Perkembangan kebijakan energi nasional dan energi baru terbarukan Indonesia,” *J. Syntax Transform.*, vol. 2, no. 12, pp. 1779–1788, 2021.
- [11] Erdiwansyah, Mahidin, H. Husin, Nasaruddin, M. Zaki, and Muhibuddin, “A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies,” *Prot. Control Mod. Power Syst.*, vol. 6, no. 1, p. 3, 2021, doi: [10.1186/s41601-021-00181-3](https://doi.org/10.1186/s41601-021-00181-3).
- [12] S. Erdogan, U. K. Pata, and S. A. Solarin, “Towards carbon-neutral world: The effect of renewable energy investments and technologies in G7 countries,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 186, p. 113683, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113683>.
- [13] O. T. Chiwaridzo, “Harnessing renewable energy technologies for energy independence within Zimbabwean tourism industry: A pathway towards sustainability,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 76, p. 101301, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101301>.
- [14] K. Dong, S. Yang, J. Wang, and X. Dong, “Revisiting energy justice: Is renewable energy technology innovation a tool for realizing a just energy system?,” *Energy Policy*, vol. 183, p. 113820, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113820>.
- [15] Y.-M. Li, K. Khan, A. A. Farooque, and M. Murshed, “Diffusion of technology and renewable energy in the G10 countries: A panel threshold analysis,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 49, p. 101115, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101115>.
- [16] A. A. Hassan and K. El-Rayes, “Optimal use of renewable energy technologies during building schematic design phase,” *Appl. Energy*, vol. 353, p. 122006, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122006>.
- [17] M. G. Fikru and J. W. A. Azure, “Renewable energy technologies and carbon capture retrofits are strategic complements,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 196, p. 122850, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122850>.
- [18] X. Wang, L.-W. Fan, and H. Zhang, “Policies for enhancing patent quality: Evidence from renewable energy technology in China,” *Energy Policy*, vol. 180, p. 113660, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113660>.
- [19] K. A. Stevens, T. Tang, and E. Hittinger, “Innovation in complementary energy technologies from renewable energy policies,” *Renew. Energy*, vol. 209, pp. 431–441, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.115>.
- [20] P. Ibarra-Gonzalez, B.-G. Rong, J. G. Segovia-Hernández, and E. Sánchez-Ramírez, “Multi-

- objective optimization methodology for process synthesis and intensification: Gasification-based biomass conversion into transportation fuels,” *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 162, p. 108327, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108327>.
- [21] J. P. M. Sanders *et al.*, “Process intensification in the future production of base chemicals from biomass,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 51, pp. 117–136, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.08.007>.
- [22] P. Ibarra-Gonzalez, C.-E. Torres-Ortega, and B.-G. Rong, “A Dual Methodology for Synthesis of Woody Biomass to Liquid (BtL) Thermochemical Conversion Routes and Bio-oil Upgrading,” in *27 European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, vol. 40, A. Espuña, M. Graells, and L. B. T.-C. A. C. E. Puigjaner, Eds. Elsevier, 2017, pp. 679–684. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50115-X>.
- [23] X. Liu *et al.*, “Heterogeneous photocatalytic conversion of biomass to biofuels: A review,” *Chem. Eng. J.*, vol. 476, p. 146794, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146794>.
- [24] Y. Wang and J. J. Wu, “Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 187, p. 113754, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113754>.