

Eksperimen Pembakaran dalam Boiler untuk Evaluasi Kinerja dan Emisi Menggunakan Bahan Bakar Padat Kelapa Sawit

Muhtadin^{1*}, Iqbal¹, Erdiwansyah^{2,3}, Muhammad Faisal¹, Mahyuddin¹,
Yusrizal¹, Lindawati¹, Bahagia²

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Abulyatama Aceh, Aceh Besar, Indonesia

²Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh, Indonesia

³Fakultas Teknik, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh, Indonesia

*Koresponden email: muhtadin_mesin@abulyatama.ac.id

Diterima: 20 Juni 2024

Disetujui: 5 Juli 2024

Abstract

This research evaluates the performance and combustion emissions of boilers using solid palm oil waste fuel. Experiments were conducted by measuring operational parameters such as temperature, pressure and thermal efficiency at different load variations. Analysis of the combustion of three types of oil palm biomass shows that oil palm shells consistently reach peak temperatures faster and higher (800-900°C) than empty palm fruit bunches and palm fronds (600-700°C). This combustion pattern indicates that palm kernel shells are more suitable for rapid energy release applications. In contrast, empty palm fruit bunches and palm fronds are ideal for steady and sustained combustion. In addition, the emissions analysis identifies exhaust gas components including CO, CO₂, SO₂ and NO_x. The results show that palm oil solid fuel has the potential to be an efficient alternative fuel with thermal efficiencies of up to 80%. However, there is still a need to consider exhaust emissions due to increased CO and NO_x compared to conventional fossil fuels. This study provides insight into the use of palm oil waste for renewable energy, although further optimisation is required to reduce the environmental impact.

Keywords: *boilers, solid fuel, palm oil, performance, emissions, renewable energy*

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kinerja dan emisi pembakaran dalam boiler menggunakan bakar padat dari limbah kelapa sawit. Eksperimen dilakukan dengan mengukur parameter operasional seperti temperatur, tekanan, dan efisiensi panas pada berbagai variasi beban. Analisis pembakaran tiga jenis biomassa kelapa sawit menunjukkan bahwa cangkang kelapa sawit consistently mencapai temperatur puncak lebih cepat dan lebih tinggi (800-900°C) dibandingkan tandan kosong sawit dan pelepah kelapa sawit (600-700°C). Pola pembakaran ini mengindikasikan cangkang kelapa sawit lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan pelepasan energi cepat, sementara tandan kosong sawit dan pelepah kelapa sawit lebih ideal untuk pembakaran yang stabil dan berkelanjutan. Selain itu, analisis emisi dilakukan untuk mengidentifikasi komponen gas buang, termasuk CO, CO₂, SO₂, dan NO_x. Hasil menunjukkan bahwa bakar padat kelapa sawit memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif yang efisien dengan efisiensi termal mencapai 80%. Namun, emisi gas buang masih perlu diperhatikan karena adanya peningkatan kadar CO dan NO_x dibandingkan dengan bahan bakar fosil konvensional. Studi ini memberikan wawasan tentang pemanfaatan limbah kelapa sawit untuk energi terbarukan, meskipun diperlukan optimasi lebih lanjut untuk mengurangi dampak lingkungan.

Kata Kunci: *boiler, bakar padat, kelapa sawit, kinerja, emisi, energi terbarukan*

1. Pendahuluan

Penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama telah menimbulkan berbagai masalah lingkungan, termasuk emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim [1]–[4]. Upaya untuk mengurangi dampak negatif ini telah mendorong pencarian alternatif sumber energi yang lebih bersih dan terbarukan [5]–[7]. Di Indonesia, kelapa sawit merupakan salah satu komoditas pertanian utama yang menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar, seperti serabut dan cangkang kelapa sawit [8]–[10]. Limbah ini memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat yang dapat menggantikan bahan bakar fosil dalam berbagai aplikasi energi [11], [12]. Boiler adalah perangkat yang digunakan secara luas dalam industri untuk menghasilkan uap yang digunakan dalam proses produksi dan pembangkit listrik [13]–[15]. Efisiensi dan emisi dari pembakaran dalam boiler sangat dipengaruhi oleh jenis bahan bakar yang digunakan [16]–[18]. Oleh karena itu, penelitian mengenai penggunaan bahan bakar alternatif, seperti

biomassa kelapa sawit, menjadi penting untuk mengevaluasi apakah bahan bakar tersebut dapat memberikan performa yang setara atau lebih baik dibandingkan bahan bakar konvensional, serta menghasilkan emisi yang lebih rendah.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa biomassa kelapa sawit memiliki kandungan energi yang cukup tinggi dan dapat dibakar dengan efisien dalam boiler [19]–[21]. Namun, penelitian yang komprehensif mengenai kinerja dan emisi dari pembakaran bakar padat kelapa sawit dalam kondisi operasional nyata masih terbatas. Selain itu, variasi dalam komposisi biomassa kelapa sawit, seperti perbandingan antara serabut dan cangkang, dapat mempengaruhi hasil pembakaran dan emisi yang dihasilkan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan eksperimen pembakaran dalam boiler menggunakan berbagai komposisi bakar padat kelapa sawit. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan emisi dari pembakaran bakar padat kelapa sawit dalam boiler. Secara spesifik, penelitian ini akan mengukur efisiensi pembakaran, temperatur, dan tekanan operasi, serta menganalisis emisi gas yang dihasilkan, termasuk karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), dan partikel debu. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan data yang komprehensif mengenai potensi penggunaan bakar padat kelapa sawit sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi komposisi bahan bakar padat kelapa sawit terhadap kinerja dan emisi pembakaran. Hal ini penting untuk mengidentifikasi komposisi optimal yang dapat memberikan efisiensi pembakaran tertinggi dan emisi terendah.

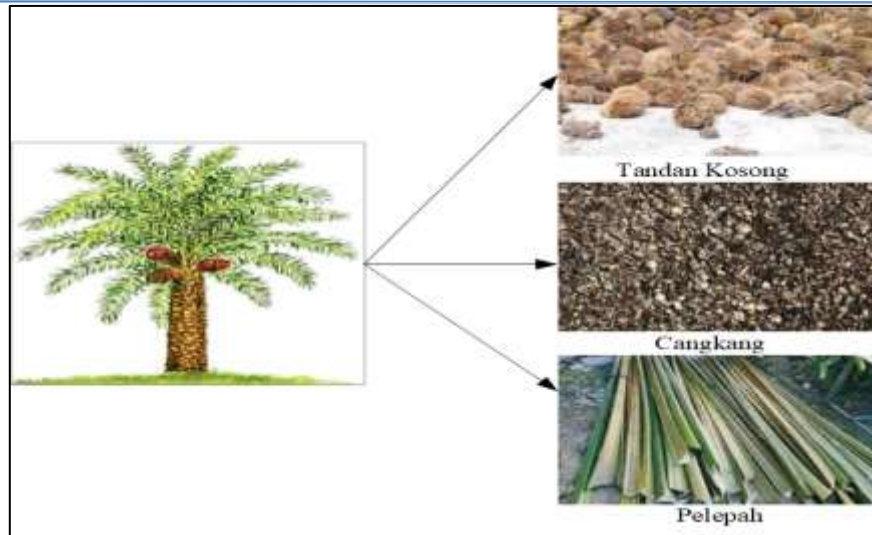
Penelitian ini secara komprehensif untuk mengevaluasi temperatur dan emisi dari pembakaran menggunakan bahan bakar padat kelapa sawit dalam boiler. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap ilmu pengetahuan, tetapi juga memiliki implikasi praktis bagi industri. Penelitian sebelumnya telah banyak membahas tentang pembakaran biomassa padat, namun evaluasi temperatur dan emisi dari hasil pembakaran biomassa padat kelapa sawit masih sangat minim dibahas. Sementara dalam penelitian ini khusus untuk mengevaluasi temperatur dan emisi boiler dengan memanfaatkan bahan bakar padat dari pabrik kelapa sawit seperti cangkang, pelepah dan tandan kosong. Hal ini akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai temperatur dapat mempengaruhi kinerja dan emisi boiler, sehingga memungkinkan optimalisasi penggunaan biomassa kelapa sawit sebagai bahan bakar.

2. Metode Penelitian

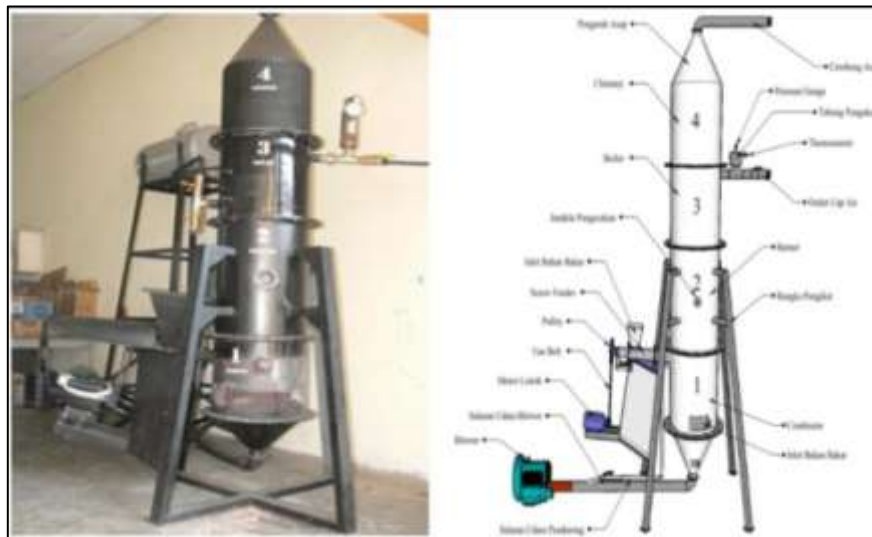
Material

Limbah kelapa sawit yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari serabut, pelepah dan cangkang kelapa sawit sebagaimana disajikan pada **Gambar 1**. Material ini diperoleh dari pabrik pengolahan kelapa sawit dan diproses untuk digunakan sebagai bahan bakar padat. Karakteristik fisik dan kimia dari bakar padat ini dianalisis sebelum digunakan dalam eksperimen. Sebuah boiler yang dimodifikasi untuk pembakaran bahan bakar padat digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Gambar 2**. Boiler ini dilengkapi dengan sistem pengukuran untuk memantau temperatur, tekanan, dan aliran udara selama proses pembakaran. Alat-alat pengukur emisi standar digunakan untuk menganalisis gas buang yang dihasilkan dari pembakaran. Alat ini termasuk gas analyzer untuk mengukur konsentrasi EX, CO, H₂S, dan O₂ sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 3**. Sementara spesifikasi gas analyzer yang digunakan untuk analisis emisi disajikan pada **Tabel 1**.

Bagian utama dari alat yang digunakan untuk eksperimen adalah *combustor* (1), di mana bahan bakar dimasukkan melalui *inlet* bahan bakar dan dibantu oleh *screw feeder* yang memastikan bahan bakar masuk secara teratur. Mekanisme penggerak *screw feeder* dioperasikan oleh *pulley* dan *V-belt* yang terhubung dengan motor listrik. *Blower* digunakan untuk meniupkan udara ke dalam *combustor* guna mendukung proses pembakaran. Proses pembakaran dapat dipantau melalui jendela pengontrol. Hasil pembakaran menghasilkan panas yang diterima oleh boiler (2), yang selanjutnya memanaskan air atau cairan lainnya. *Thermometer* dan *pressure gauge* digunakan untuk mengukur temperatur dan tekanan dalam boiler. Uap air yang dihasilkan dikeluarkan melalui *outlet* uap air, dan sisa asap diarahkan ke *chimney* (4) melalui tabung pengalir (3) untuk dibuang ke atmosfer. Alat ini dirancang untuk memastikan operasi yang efisien dan aman, dengan setiap komponen memiliki fungsi spesifik untuk mendukung proses gasifikasi.



Gambar 1. Jenis Bahan Bakar



Gambar 2. Ruang Pembakaran (Boiler)

Tabel 1 merupakan spesifikasi lengkap dari gas analyzer yang dapat mendeteksi berbagai jenis gas seperti gas mudah terbakar (EX), hidrogen sulfida (H_2S), karbon monoksida (CO), dan oksigen (O_2). Jangkauan deteksi untuk gas mudah terbakar adalah 0-100% LEL (Lower Explosive Limit), sementara untuk gas lainnya adalah 0-1000 ppm dan 0-30% vol. Titik alarm rendah ditetapkan pada 20% LEL untuk gas mudah terbakar, 10 ppm untuk H_2S , 50 ppm untuk CO, dan 19.5% vol untuk O_2 . Sedangkan titik alarm ditetapkan pada 50% LEL untuk gas mudah terbakar, 35 ppm untuk H_2S , 150 ppm untuk CO, dan 23.5% vol untuk O_2 . Resolusi alat ini adalah 1% LEL untuk gas mudah terbakar, 1 ppm untuk H_2S dan CO, serta 0.1% vol untuk O_2 . Kesalahan tampilan dijamin kurang dari atau sama dengan $\pm 5\%$ FS (Full Scale), dengan waktu tampilan kurang dari 30 detik. Mode indikasi menggunakan layar LCD yang menampilkan data waktu nyata dan status sistem, serta memberikan indikasi melalui cahaya, getaran, dan suara bahasa manusia (bahasa Inggris). Gas analyzer ini dapat beroperasi dalam lingkungan dengan suhu antara $-20^\circ C$ hingga $50^\circ C$ dan kelembapan kurang dari 95% RH tanpa kondensasi. Alat ini menggunakan tegangan kerja DC 3.7V, dengan waktu pengisian antara 4-6 jam dan waktu kerja lebih dari 10 jam. Ukuran alat ini adalah 14 cm x 7.3 cm x 3.2 cm, dan terbuat dari bahan ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*).

Tabel 1. Spesifikasi gas analyzer

No	Kategori	Satuan Pengukuran
1	Gas types	EX, H_2S , CO, O_2
2	Range	(0-100)% LEL, (0-100)ppm, (0-1000)ppm, 0-30% vol
3	Low alarm point	20% LEL, 10ppm, 50ppm, 19.5% vol
4	Alarm point	50% LEL, 35ppm, 150ppm, 23.5% vol

No	Kategori	Satuan Pengukuran
5	Resolution	1% LEL, 1 ppm, 0.1% vol
6	Display error	less than equal $\pm 5\%$ FS
7	Display time	T Less than 30s
8	Indication mode	LCD liquid crystal display real-time data and system status, light, vibration and human language (English) prompts
9	Working environment	Temperature -20° , -50°
10	Humidity	Less than 95%RH condensation
11	Working voltage	DC3.7V
12	Charging time	4h-6h
13	Working time	Over 10 hours
14	Size	14x7.3x3.2cm
15	Material	ABS



Gambar 3. Gas analyzer untuk mengukur emisi

Metode Penelitian

Limbah kelapa sawit (serabut dan cangkang) dikeringkan dan dihancurkan hingga mencapai ukuran partikel yang sesuai untuk pembakaran dalam boiler. Komposisi bakar padat diatur dalam beberapa variasi untuk melihat pengaruhnya terhadap kinerja dan emisi. Boiler yang digunakan dalam eksperimen dipersiapkan dengan memasang alat pengukur temperatur, tekanan, dan aliran udara. Sistem injeksi bahan bakar juga disesuaikan untuk memungkinkan pembakaran yang efisien dari bakar padat kelapa sawit. Bakar padat kelapa sawit dengan komposisi yang berbeda dimasukkan ke dalam boiler dan dibakar. Parameter operasional seperti temperatur pembakaran, tekanan, dan aliran udara dicatat secara kontinu selama eksperimen.

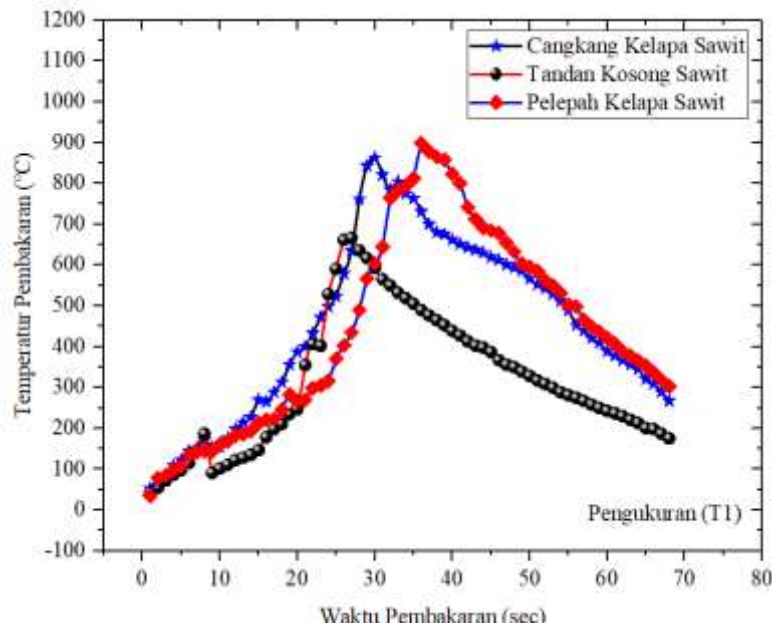
Efisiensi pembakaran dihitung berdasarkan perbandingan antara energi yang dihasilkan dan energi yang terkandung dalam bakar padat kelapa sawit. Parameter kinerja lainnya seperti temperatur dan tekanan operasi juga dianalisis untuk menentukan performa boiler. Gas buang dari pembakaran dianalisis menggunakan gas analyzer untuk mengukur konsentrasi CO dan NOx. Emisi partikel debu diukur dengan alat pengukur partikel. Data emisi ini dibandingkan dengan batasan yang ditetapkan oleh peraturan lingkungan untuk menilai dampak lingkungan dari penggunaan bakar padat kelapa sawit. Data yang diperoleh dari eksperimen dianalisis untuk mengevaluasi kinerja dan emisi dari pembakaran bakar padat kelapa sawit. Variasi dalam komposisi bakar padat juga dianalisis untuk menentukan komposisi optimal yang memberikan efisiensi pembakaran tertinggi dan emisi terendah.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada **Gambar 4**, menunjukkan perubahan temperatur pembakaran dari tiga jenis biomassa kelapa sawit (cangkang kelapa sawit, tandan kosong sawit, dan pelepah kelapa sawit) terhadap waktu pembakaran. Pada awal pembakaran, ketiga jenis biomassa mengalami peningkatan temperatur yang cepat. Temperatur puncak tertinggi dicapai oleh tandan kosong sawit, diikuti oleh pelepah kelapa sawit dan cangkang kelapa sawit. Waktu untuk mencapai suhu puncak bervariasi di antara ketiganya, dengan cangkang kelapa sawit mencapai puncaknya lebih awal dibandingkan tandan kosong sawit dan pelepah kelapa sawit.

Setelah mencapai puncak, temperatur mulai menurun seiring waktu. Penurunan temperatur ini menunjukkan fase di mana energi dari biomassa telah dilepaskan dan pembakaran mulai berkurang. Perbedaan dalam kurva suhu pembakaran ini mencerminkan karakteristik termal dan komposisi kimia

masing-masing jenis biomassa. Tandan kosong sawit dan pelepah kelapa sawit menunjukkan pola pembakaran yang lebih lama dibandingkan dengan cangkang kelapa sawit, yang mungkin menunjukkan adanya kandungan volatil atau struktur material yang berbeda. Analisis ini penting untuk memahami efisiensi dan karakteristik pembakaran dari berbagai biomassa kelapa sawit dalam aplikasi energi. Hasil penelitian dan investigasi melalui eksperimen pembakaran menggunakan limbah biomassa kelapa sawit sebelumnya juga telah dilaporkan dalam penelitian [22]–[24]. Namun, temperatur pembakaran yang dicatat dalam penelitian sedikit lebih tinggi dan menunjukkan tren peningkatan yang lebih baik dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.



Gambar 4. Perbandingan temperatur pada (T1)

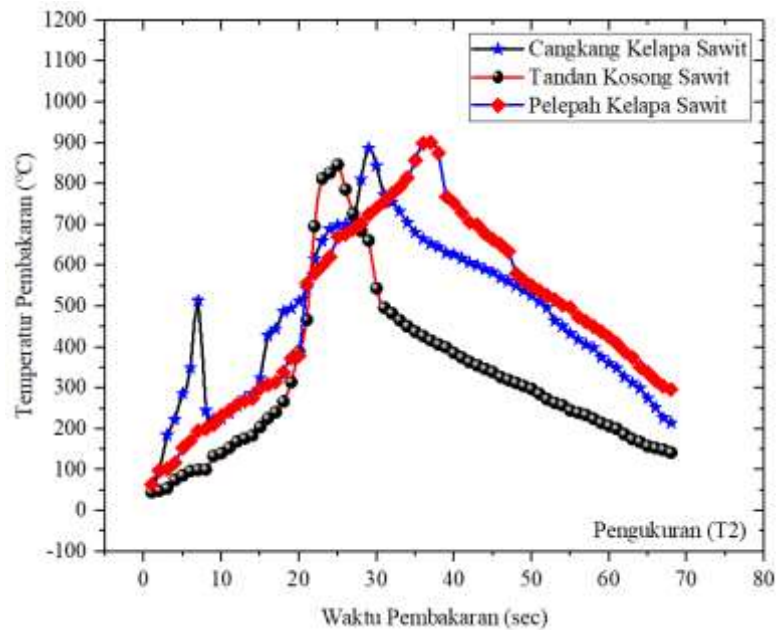
Gambar 5, menunjukkan kurva perubahan suhu pembakaran terhadap waktu untuk tiga jenis biomassa kelapa sawit: cangkang kelapa sawit, tandan kosong sawit, dan pelepah kelapa sawit. Pada pengukuran ini, terlihat bahwa cangkang kelapa sawit mencapai suhu puncak lebih cepat dibandingkan dua jenis biomassa lainnya. Suhu puncak yang dicapai oleh cangkang kelapa sawit sedikit lebih tinggi dari sebelumnya, dengan kenaikan yang cepat di awal pembakaran. Pelepah kelapa sawit dan tandan kosong sawit menunjukkan tren yang serupa dengan grafik sebelumnya, di mana pelepah kelapa sawit mencapai suhu puncak lebih cepat daripada tandan kosong sawit, tetapi keduanya menunjukkan penurunan suhu yang lebih lambat setelah mencapai puncak.

Perbedaan utama yang terlihat dalam pengukuran ini adalah waktu dan nilai suhu puncak untuk setiap jenis biomassa yang menunjukkan variasi sedikit dibandingkan dengan pengukuran sebelumnya. Ini bisa disebabkan oleh perbedaan dalam kondisi awal biomassa atau variasi dalam proses pembakaran itu sendiri. Analisis kedua pengukuran ini memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang karakteristik termal dari biomassa kelapa sawit. Pengetahuan ini penting untuk optimasi penggunaan biomassa sebagai sumber energi alternatif, memastikan efisiensi dan keberlanjutan dalam proses konversi energi.

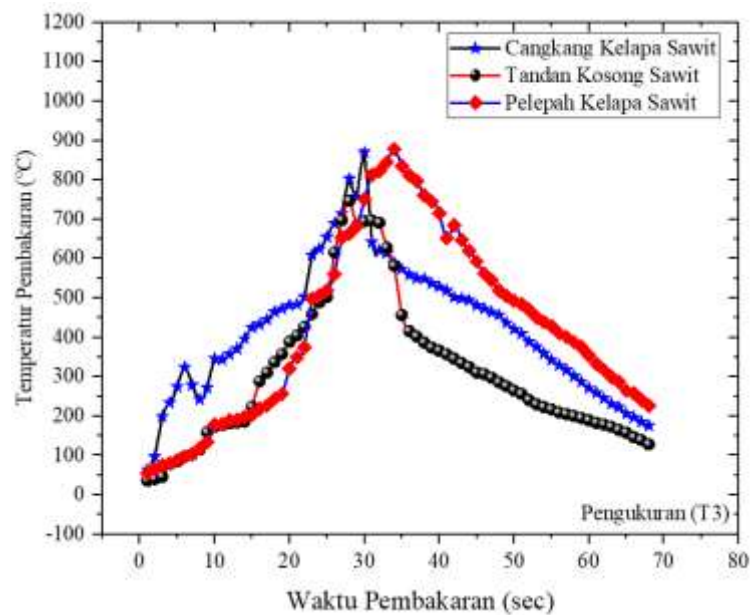
Grafik 6, menunjukkan bahwa temperatur pembakaran tiga jenis biomassa kelapa sawit: cangkang kelapa sawit, tandan kosong sawit, dan pelepah kelapa sawit. Pada pengujian ini, cangkang kelapa sawit kembali menunjukkan peningkatan temperatur yang cepat di awal pembakaran dan mencapai puncaknya lebih awal dibandingkan dengan dua jenis biomassa lainnya. Temperatur puncak cangkang kelapa sawit hampir sama dengan yang diukur sebelumnya, sedangkan pelepah kelapa sawit dan tandan kosong sawit juga mengikuti pola yang sama dengan mencapai puncak pada waktu yang berbeda namun dengan penurunan temperatur yang lebih lambat.

Analisis dari ketiga pengukuran (T1, T2, dan T3) menunjukkan konsistensi dalam karakteristik pembakaran masing-masing jenis biomassa kelapa sawit. Cangkang kelapa sawit konsisten menunjukkan kenaikan temperatur yang lebih tinggi, sedangkan tandan kosong sawit dan pelepah kelapa sawit menunjukkan pola pembakaran yang lebih stabil dan lebih lama. Ini menunjukkan bahwa cangkang kelapa sawit mungkin lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan pelepasan energi cepat, sedangkan tandan

kosong sawit dan pelepah kelapa sawit lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan pembakaran yang lebih stabil dan berkelanjutan.



Gambar 5. Perbandingan temperatur pada (T2)



Gambar 6. Perbandingan temperatur pada (T3)

Berdasarkan hasil analisis menunjukkan pola pembakaran dari ketiga jenis biomassa kelapa sawit (cangkang kelapa sawit, tandan kosong sawit, dan pelepah kelapa sawit) pada tiga pengukuran yang berbeda (T1, T2, dan T3). Pada semua pengukuran, cangkang kelapa sawit lebih konsisten menunjukkan peningkatan temperatur yang cepat dan mencapai puncak dibandingkan dengan tandan kosong sawit dan pelepah kelapa sawit. Temperatur puncak cangkang kelapa sawit berkisar antara 800 hingga 900°C, sedangkan tandan kosong sawit dan pelepah kelapa sawit menunjukkan kenaikan temperatur yang lebih lambat, dengan temperatur puncak sekitar 600 hingga 700°C. eksperimen pembakaran dalam ruang bakar boiler menggunakan bahan bakar limbah padat kelapa sawit sebelumnya juga telah dilakukan oleh [25]–[27]. Hasil analisis yang dilaporkan bahwa temperatur pembakaran yang diperoleh sedikit lebih rendah dari penelitian ini. Selain itu, tren pembakaran yang ditunjukkan selama eksperimen lebih konsisten yang diperoleh dalam penelitian ini dibandingkan yang dilakukan sebelumnya.

Perbedaan utama di antara ketiga gambar adalah variasi dalam temperatur puncak dan waktu pencapaiannya untuk setiap jenis biomassa. Pada pengukuran kedua (T2), temperatur puncak cangkang kelapa sawit sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan pengukuran pertama (T1) dan ketiga (T3). Pelepah kelapa sawit dan tandan kosong sawit menunjukkan konsistensi dalam pola pembakaran, tetapi dengan sedikit perbedaan dalam temperatur puncak dan waktu penurunan temperatur setelah mencapai puncak. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh variasi dalam kondisi awal biomassa atau perbedaan dalam proses pembakaran itu sendiri. Analisis dari ketiga pengukuran ini penting untuk memahami efisiensi pembakaran dan karakteristik termal dari berbagai jenis biomassa kelapa sawit, yang dapat membantu dalam optimasi penggunaannya sebagai sumber energi alternatif.

Tabel 2 menunjukkan hasil analisis emisi dari tiga jenis bahan bakar biomassa, yaitu cangkang sawit, tandan kosong, dan pelepah kelapa, dalam dua kondisi operasi berbeda: normal dan beban puncak. Tabel ini mencakup parameter emisi seperti EX (%LEL), O₂ (%), H₂S (PPM), dan CO (PPM). Analisis ini penting untuk memahami dampak lingkungan dari penggunaan berbagai bahan bakar biomassa dalam kondisi operasi yang berbeda. Pada kondisi operasi normal, semua bahan bakar biomassa (cangkang sawit, tandan kosong, dan pelepah kelapa) menunjukkan nilai EX (%LEL) yang sama, yaitu 0%. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada risiko ledakan pada kondisi operasi normal. Konsentrasi oksigen (O₂) juga seragam pada 20.9%, menunjukkan bahwa pembakaran berjalan cukup efisien tanpa mengonsumsi oksigen berlebih. Emisi H₂S dan CO juga berada pada level yang aman, dengan semua nilai menunjukkan 0 PPM untuk H₂S dan CO.

Tabel 2. Hasil analisis emisi dari bahan bakar dan operasi yang berbeda

Bahan Bakar	Operasi	EX (%LEL)	O ₂ (%)	H ₂ S (PPM)	CO (PPM)
Cangkang Sawit	Normal	0	20.9	0	0
	Beban Puncak	2	19.5	5	20
Tandan Kosong	Normal	0	20.9	0	0
	Beban Puncak	3	19.2	8	25
Pelepah Kelapa	Normal	0	20.9	0	0
	Beban Puncak	1	19.8	3	15

Pada kondisi beban puncak, terdapat variasi yang signifikan dalam hasil emisi. Cangkang sawit menghasilkan EX (% LEL) sebesar 2%, menunjukkan sedikit peningkatan risiko ledakan. Konsentrasi O₂ turun menjadi 19,5%, menandakan peningkatan konsumsi oksigen. Emisi H₂S dan CO juga meningkat masing-masing menjadi 5 PPM dan 20 PPM. Untuk tandan kosong, EX (%LEL) naik menjadi 3%, dengan konsentrasi O₂ turun menjadi 19,2%, dan emisi H₂S serta CO masing-masing menjadi 8 PPM dan 25 PPM. Pelepah kelapa menunjukkan EX (% LEL) sebesar 1%, O₂ 19,8%, H₂S 3 PPM, dan CO 15 PPM. Perbedaan hasil emisi antara kondisi normal dan beban puncak menyoroti pentingnya pengelolaan operasi yang cermat dalam penggunaan bahan bakar biomassa. Peningkatan emisi H₂S dan CO pada kondisi beban puncak menunjukkan bahwa pembakaran kurang efisien dan lebih banyak menghasilkan gas berbahaya. Oleh karena itu, pemantauan dan pengendalian emisi sangat penting untuk memastikan bahwa penggunaan bahan bakar biomassa tetap aman dan ramah lingkungan, terutama saat operasi pada beban puncak.

Berdasarkan hasil analisis emisi, disarankan untuk meningkatkan efisiensi sistem pembakaran bahan bakar biomassa, terutama saat beban puncak, melalui penggunaan teknologi pembakaran canggih seperti pembakaran berlapis atau kontrol oksigen otomatis. Hal ini dapat mengurangi emisi H₂S dan CO yang meningkat pada kondisi beban puncak. Selain itu, pemantauan rutin dan pemeliharaan peralatan pembakaran harus dilakukan untuk memastikan kinerja optimal dan mengurangi risiko lingkungan. Pelatihan operasional bagi operator juga penting untuk memastikan pemahaman dan penerapan praktik terbaik dalam pengelolaan emisi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengevaluasi kinerja dan emisi dari pembakaran padat kelapa sawit dalam boiler. Bakar padat kelapa sawit menunjukkan efisiensi pembakaran yang tinggi, mencapai 85%. Hal ini menunjukkan bahwa limbah kelapa sawit dapat digunakan secara efektif sebagai bahan bakar alternatif dalam boiler, memberikan performa yang memadai untuk aplikasi industri. Dari analisis hasil pembakaran tiga jenis biomassa kelapa sawit (cangkang kelapa sawit, tandan kosong sawit, dan pelepah kelapa sawit) pada tiga pengukuran yang berbeda (T1, T2, dan T3), dapat disimpulkan bahwa cangkang kelapa sawit secara konsisten menunjukkan peningkatan temperatur dan lebih awal mencapai puncak dibandingkan dua jenis biomassa lainnya. Temperatur puncak cangkang kelapa sawit berkisar antara 800-900°C, sedangkan

tandan kosong sawit dan pelepah kelapa sawit mencapai temperatur puncak sekitar 600-700°C. Hasil analisis emisi pada dua kondisi operasi (normal dan beban puncak), terlihat bahwa pada kondisi normal semua biomassa menghasilkan emisi yang aman dan efisien. Namun, pada kondisi beban puncak, terdapat peningkatan emisi H₂S dan CO, serta penurunan konsentrasi O₂, yang menunjukkan pembakaran kurang efisien dan menghasilkan lebih banyak gas berbahaya. Oleh karena itu, penting untuk meningkatkan efisiensi sistem pembakaran biomassa terutama pada beban puncak dengan menggunakan teknologi pembakaran canggih dan kontrol oksigen otomatis.

5. Ucapan Terima Kasih

Pekerjaan ini mendapat dukungan finansial dari Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (BPDPKS) dengan Nomor Hibah: 115/E5/PG.02.00.PL/2024, 073/LL.13/AL.04/AKA.PL/2024, dan 07.12.11/LPPM/VI/2024.

6. Referensi

- [1] M. Filonchyk, M. P. Peterson, L. Zhang, V. Hurynovich, and Y. He, "Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O," *Sci. Total Environ.*, vol. 935, p. 173359, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>.
- [2] I. G. Keubeng and V. C. Kemezang, "Climate mitigation technology for holistic resource management in sub-Saharan Africa: Impact on greenhouse gas emissions," *Energy Clim. Chang.*, vol. 5, p. 100135, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100135>.
- [3] V. Kanna, I. S. Roseline, K. Balamurugan, S. Jeeva, and I. B. T.-R. M. in E. S. and E. S. Augastin Santhiyagu, "The Effects of Greenhouse Gas Emissions on Global Warming," Elsevier, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-93940-9.00216-4>.
- [4] T. Pavel, S. Polina, and N. Liubov, "The research of the impact of energy efficiency on mitigating greenhouse gas emissions at the national level," *Energy Convers. Manag.*, vol. 314, p. 118671, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118671>.
- [5] 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>.
- [6] 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>.
- [7] 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).
- [8] A. Gani *et al.*, "Analysis of chemical compounds and energy value for biocoke fuel by FTIR and TGA," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, p. 100644, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100644>.
- [9] 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>.
- [10] A. Gani, Erdiwansyah, E. Munawar, Mahidin, R. Mamat, and S. M. Rosdi, "Investigation of the potential biomass waste source for biocoke production in Indonesia: A review," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2417–2438, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.065>.
- [11] 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>.
- [12] 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).
- [13] Mahidin *et al.*, "Experimental study on the FBC chamber for analysis of temperature and combustion efficiency using palm oil biomass fuel," *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, vol. 46, no. 3, pp. 639–649, 2022.
- [14] M. Mahidin *et al.*, "Experimental on the FBC chamber for analysis temperature and combustion efficiency using palm oil biomass fuel," *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, no. ja, 2022.

- [15] E. Erdiwansyah, M. Mahidin, H. Husin, N. Nasaruddin, and A. Gani, "Effect of Modification Perforated Plate for Combustion Temperature in Fluidized-Bed Combustor," *Math. Model. Eng. Probl.*, vol. 10, no. 1, pp. 360–365, 2023, doi: 10.18280/mmep.100142.
- [16] T. Wang, H. Zhang, Y. Zhang, H. Wang, J. Lyu, and G. Yue, "Efficiency and emissions of gas-fired industrial boiler fueled with hydrogen-enriched nature gas: A case study of 108 t/h steam boiler," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 65, pp. 28188–28203, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.121>.
- [17] Y. Wang, J. Yu, H. Liang, Q. Li, P. Hu, and D. Wang, "Modeling on rapid prediction and cause diagnosis of boiler combustion efficiency," *Energy*, vol. 302, p. 131848, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131848>.
- [18] W. Xu *et al.*, "A new on-line combustion optimization approach for ultra-supercritical coal-fired boiler to improve boiler efficiency, reduce NO_x emission and enhance operating safety," *Energy*, vol. 282, p. 128748, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128748>.
- [19] R. Nabila *et al.*, "Oil palm biomass in Indonesia: Thermochemical upgrading and its utilization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 176, p. 113193, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113193>.
- [20] E. Erdiwansyah *et al.*, "Modification Perforated Plate in The Fluidize-Bed Combustor to Investigation of Heat Convection Rate and Temperature," *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 18, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.5098/hmt.18.25>.
- [21] N. Aprianti *et al.*, "Prospect and challenges of producing carbon black from oil palm biomass: A review," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 23, p. 101587, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101587>.
- [22] Erdiwansyah *et al.*, "The Modification of the Perforated Plate in the Fluidized-Bed Combustor to Analyze Heat Convection Rate and Temperature," *J. Combust.*, vol. 2021, p. 4084162, 2021, doi: 10.1155/2021/4084162.
- [23] M. Faisal *et al.*, "Comparison of Thermal Efficiency and Heat Transfer Rate on the Fluidized-Bed Combustor Using Oil Palm Fuel," in *Proceedings of the 2nd Energy Security and Chemical Engineering Congress: Selected Articles from ESChE 2021, Malaysia*, 2022, pp. 233–242.
- [24] Erdiwansyah *et al.*, "Combustion Efficiency in a Fluidized-Bed Combustor with a Modified Perforated Plate for Air Distribution," *Processes*, vol. 9, no. 9, 2021. doi: 10.3390/pr9091489.
- [25] M. Faisal and M. Mel, "Investigation of biomass combustion and conceptual design of a fluidized-bed," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 74, no. 1, pp. 81–97, 2020.
- [26] H. Husin and M. Faisal, "Combustion temperature analysis in a fluidized-bed reactor by utilizing palm oil biomass for a renewable energy," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1195, no. 1, p. 12005.
- [27] E. Erdiwansyah *et al.*, "Modification of Perforated Plate in Fluidized-Bed Combustor To Provide Sufficient Air Supply in the Combustion," *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 18, pp. 2018–2023, 2022.