

## Produksi *biocoal* berbahan tandan kosong kelapa sawit dengan metode torefaksi menggunakan reaktor tubular berkapasitas 50 kg/jam

Awaludin Martin<sup>a,b,1</sup>, Donnie Hafiz Prasetya Ritonga<sup>b</sup>, Muhammad Zulfikar Alhakimi<sup>b</sup>,

<sup>a</sup>Program Studi Sarjana Teknik Mesin, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Panam KM 12,5 Pekanbaru, 28293

<sup>b</sup>Program Studi Sarjana Teknik Mesin, Universitas Riau Kampus Bina Widya, Panam KM 12,5 Pekanbaru, 28293

<sup>1</sup>[awaludinmartin01@gmail.com](mailto:awaludinmartin01@gmail.com)

### ABSTRACT

This research aims to improve the quality of biomass into *biocoal* made from empty palm oil fruit bunches by reducing potassium and chlorine content and increasing the calorific value of *biocoal*. The production capacity is scaled up to 50,000 grams or 50 kg, with process temperature variations of 300°C, 350°C, and 400°C using the torrefaction method in a tubular reactor. The findings show that torrefaction is effective in enhancing the calorific value of *biocoal* while significantly reducing the content of Potassium, Potassium Oxide, and Chlorine by 14.64%, 11.14%, and 1.4%, respectively. At 400°C, the calorific value of the *biocoal* reached 5047.32 Kcal/kg, with a mass yield of 7% and an energy yield of 20.16%.

**Keywords:** empty fruit bunches of palm oil, torrefaction, *biocoal*, calorific value

**Received** 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590799

### PENDAHULUAN

Ketergantungan pada bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama telah menyebabkan masalah yang signifikan, terutama dalam hal keamanan energi dan keberlanjutan lingkungan. Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan populasi besar dan pertumbuhan ekonomi yang pesat, perlu menemukan solusi alternatif untuk mengatasi tantangan energi. Energi sangat penting bagi perekonomian, baik digunakan sebagai bahan bakar, bahan baku, maupun komoditas ekspor. Seiring dengan pertumbuhan penduduk dan ekonomi, kebutuhan akan energi juga meningkat. Oleh karena itu, Indonesia membutuhkan berbagai sumber daya, termasuk sumber daya manusia, sumber daya alam seperti bahan bakar fosil (batubara, minyak), dan sumber energi terbarukan. Mengingat situasi saat ini di mana setiap permintaan dan aktivitas membutuhkan energi dalam jumlah besar, pasokan energi yang substansial sangat diperlukan. Oleh karena itu, Indonesia harus memaksimalkan penggunaan energi, terutama dari sumber yang memiliki ambang batas sangat tinggi dan ketersediaan energi yang memadai (Thamrin et al., 2023).

Pengembangan energi terbarukan telah menjadi fokus utama dalam upaya menciptakan masa depan yang berkelanjutan. Salah satu inovasi menarik di bidang ini adalah pengembangan biomassa. Bahan bakar fosil, termasuk minyak, batu bara, dan gas alam, saat ini merupakan sumber energi utama di seluruh dunia. Namun, diperkirakan sumber energi ini akan habis dalam 40-50 tahun ke depan. Selain

itu, dunia sedang berupaya untuk mengurangi emisi karbon hingga 80% dan beralih ke berbagai sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan, seperti energi surya, angin, dan biomassa, secara berkelanjutan. Energi terbarukan cenderung tidak menyebabkan kerusakan lingkungan seperti pemanasan global, hujan asam, dan kabut asap perkotaan. Hampir 80% konsumsi energi global berasal dari bahan bakar fosil, yang mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia dengan meningkatkan emisi CO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub>. Sumber energi terbarukan menyediakan energi bersih dengan emisi gas rumah kaca (CO<sub>2</sub>) nol dan tingkat NO<sub>x</sub> yang rendah. Setelah bahan bakar fosil, biomassa merupakan sumber energi terbesar keempat di dunia, menyumbang sekitar 11-12% dari konsumsi energi primer global (Mokheimer et al., 2023).

Meningkatnya kebutuhan dan ketergantungan terhadap energi sejalan dengan menipisnya cadangan minyak dan batu bara. Berbagai jenis energi dapat dimanfaatkan, salah satunya adalah energi terbarukan yang berasal dari alam dan dapat diperbarui. Diperlukan energi alternatif jangka panjang untuk menggantikan pasokan energi fosil yang semakin menipis. Pemerintah seharusnya fokus pada penggunaan energi baru terbarukan dan mengurangi penggunaan energi fosil untuk mencapai kondisi ramah lingkungan melalui penggunaan energi terbarukan. Menurut Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017, pengembangan potensi energi baru terbarukan (EBT) mencakup Bioenergi: Pengembangan bioenergi untuk listrik diperkirakan mencapai 5,5 GW pada tahun 2025 dan

26,0 GW pada tahun 2050, atau 80% dari potensi biomassa sebesar 32,7 GW. Beberapa potensi energi terbarukan yang perlu dikaji adalah energi biomassa, karena sebagian besar bersumber dari tanaman pertanian seperti sekam padi, ampas tebu, cangkang kelapa sawit, tongkol jagung, kayu, dan arang (Hasan et al., 2022).

Limbah kelapa sawit, terutama tandan kosong kelapa sawit (TKKS), merupakan sumber biomassa yang melimpah. Industri kelapa sawit, sebagai produsen biomassa terbesar, telah meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir, terutama di wilayah tropis. Indonesia, sebagai negara tropis, memiliki 14.326.350 hektar perkebunan kelapa sawit pada tahun 2018, yang meningkat menjadi 14.996.010 hektar pada tahun 2020. TKKS adalah produk sampingan padat dari industri kelapa sawit yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin, dengan kandungan air sebesar 44,21%, selulosa 16,68%, hemiselulosa 35,51%, dan kadar abu 0,26%. Produksi kelapa sawit di Indonesia berlanjut dari tahun 2015 hingga 2020 dengan total produksi 31,07-48,30 juta ton, mencapai 49,71 juta ton pada tahun 2021, yang menunjukkan peningkatan produksi setiap tahunnya (Windiastuti et al., 2023).

Mengingat situasi ini, diperlukan metode yang tepat untuk memanfaatkan dan mengolah limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi *biocoal* sebagai bahan bakar alternatif yang mampu menghasilkan bahan bakar padat setara batu bara. Salah satu teknologi yang digunakan untuk mengubah TKKS menjadi bahan bakar dengan nilai kalor tinggi adalah torrefaksi. Torrefaksi adalah proses perlakuan termal pada suhu 200-400°C pada tekanan atmosfer tanpa oksigen. Hasil dari proses torrefaksi adalah produk padat dan gas. Saat ini, penggunaan limbah padat kelapa sawit untuk produksi energi baru masih terbatas, terutama sebagai bahan bakar padat di boiler (Haryanto et al., 2021). Pemanfaatan limbah kelapa sawit menghadapi tantangan karena biaya persiapan yang relatif tinggi dan perlunya mengurangi kadar air yang tinggi, yang membuatnya kurang direkomendasikan sebagai bahan bakar karena dapat menurunkan suhu pembakaran dan efisiensi energi (Suksong et al., 2020).

Tandan kosong kelapa sawit telah digunakan sebagai bahan bakar boiler di pabrik kelapa sawit, namun pemanfaatannya belum optimal. Hal ini disebabkan oleh rendahnya nilai kalor tandan kosong kelapa sawit serta tingginya kandungan klorin dan kalium. Kandungan klorin yang tinggi menyebabkan erosi pada dinding boiler, yang

mengurangi kinerja boiler dan, dalam jangka panjang, merusak dinding boiler. Kandungan kalium yang tinggi bereaksi dengan oksigen selama proses pembakaran dan menghasilkan Kalium Oksida (K<sub>2</sub>O). Kalium Oksida (K<sub>2</sub>O) adalah abu yang menempel pada dinding air boiler, yang mengganggu proses pembakaran di dalam boiler. Kandungan kalium dan klorin yang tinggi serta nilai kalor tandan kosong kelapa sawit yang rendah adalah alasan mengapa mereka tidak langsung digunakan sebagai bahan bakar di pembangkit listrik tenaga uap. Penelitian untuk mengurangi kadar kalium dan klorin serta meningkatkan nilai kalor tandan kosong kelapa sawit merupakan upaya yang harus terus dilakukan agar pencapaian penggunaan campuran energi baru dan terbarukan, sesuai dengan target pemerintah, dapat tercapai.

Tandan kosong kelapa sawit telah digunakan sebagai bahan bakar boiler di pabrik kelapa sawit, namun pemanfaatannya belum optimal. Selain memiliki nilai kalor yang rendah, tandan kosong kelapa sawit juga mengandung kalium (K) dan klorin (Cl) yang dalam jangka panjang dapat mengurangi kinerja boiler. Meskipun biomassa dianggap netral karbon (CO<sub>2</sub>-netral), tingginya kandungan kalium dan klorin dalam biomassa menyebabkan emisi partikulat yang tinggi, penumpukan abu, dan korosi pada fasilitas pembakaran (Niu et al., 2019). Penggunaan berbagai jenis biomassa sebagai bahan bakar boiler dapat menimbulkan risiko kontaminasi dan kerusakan peralatan pemanas boiler, seperti slagging, fouling, korosi, aglomerasi, dan sintering (Harnowo & Yunaidi, 2021).

Proses pencucian dapat mengurangi kandungan kalium. Proses ini dianggap mudah karena kalium sangat larut dalam air. Mengingat kandungan kalium dalam proses pencucian sangat tergantung pada kelarutan air, parameter proses yang mempengaruhi pencucian adalah rasio air pencucian terhadap biomassa, suhu air pencucian, dan waktu pencucian (Wenas & Hardianto, 2022). Dalam penelitian sebelumnya dengan kapasitas produksi 100 gram, ditemukan bahwa kandungan kalium menurun hingga 5% setelah tandan kosong kelapa sawit dicuci dengan air gambut pada laju aliran 5 liter per menit selama 30 menit (Martin et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan produksi *biocoal* dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) hingga 50 kg/jam menggunakan metode torrefaksi dalam reaktor tubular. Studi ini berupaya meningkatkan nilai kalor *biocoal* melalui variasi suhu 300°C, 350°C, dan 400°C. Pengembangan

metode untuk meningkatkan kualitas TKKS sebagai bahan bakar ramah lingkungan dengan cara meningkatkan nilai kalor *biocoal* melalui proses torrefaksi sangat diperlukan. Penelitian sebelumnya berfokus pada mekanisme torrefaksi *biocoal* dan membandingkan berbagai jenis reaktor untuk meningkatkan efisiensi sistem. Namun, reaktor tubular yang digunakan tidak memodelkan torrefaksi dengan baik dan memiliki kapasitas terbatas. Studi ini dilakukan dengan bobot sampel yang lebih besar (skala naik) untuk mengamati perkembangan nilai kalor dalam berbagai jumlah TKKS yang dihasilkan menjadi *biocoal*.

**METODOLOGI**

*Bahan dan alat*

*Tandan kosong kelapa sawit (TKKS)*

Pengumpulan data yang dilakukan melibatkan pengumpulan karakteristik tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang akan digunakan sebagai bahan baku dalam proses simulasi torrefaksi. Karakteristik komponen TKKS yang digunakan mencakup analisis ultimate dan proximate. Karakteristik ultimate dan proximate yang digunakan berasal dari data sekunder, seperti yang ditunjukkan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 1. Komposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit

Data Komposisi Komponen TKKS								
Analisis Proksimat (%)				Analisis Ultimat (%)				
MC	VM	FC	ASh	C	H	N	S	O
15.77	65.01	15.37	3.85	43.53	7.20	1.73	0.46	47.09

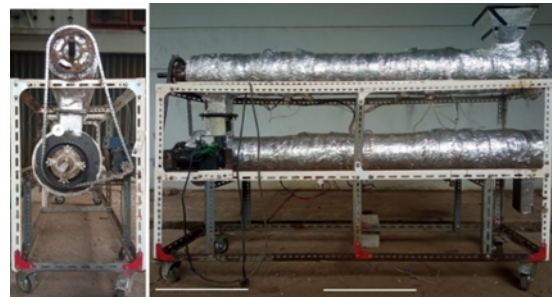


Gambar 1. Tandan Kosong Kelapa Sawit

*Reaktor Torefaksi Tubular*

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental di mana tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dipotong dan kemudian dicuci dengan air gambut, dengan variasi laju aliran dan durasi pencucian. Laju aliran air gambut yang digunakan mencapai hingga 100 liter per menit, dan durasi pencucian berlangsung hingga 60 menit untuk tandan kosong kelapa sawit dengan berat mencapai 50.000 gram atau 50 kg. Proses pengeringan dan torrefaksi

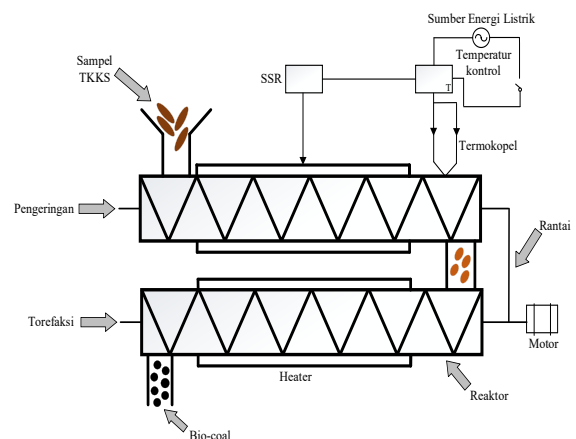
dilakukan menggunakan reaktor tubular yang terbuat dari baja tahan karat (stainless steel) dan dilengkapi dengan band heater keramik untuk memanggang sampel TKKS. Reaktor tubular yang digunakan (ditunjukkan pada gambar) memiliki kapasitas pemrosesan sebesar 50 kg dengan daya 3.500 watt. Kecepatan motor reaktor dikontrol menggunakan unit pengatur kecepatan untuk mencapai waktu pemrosesan selama 60 menit.



Gambar 2. Reaktor Tubular

- Kapasitas Reaktor : 50 kg/jam
- Diameter Pipa : 152 mm
- Diameter *screw conveyor* : 144 mm
- Panjang Pipa : 1600 mm
- Panjang *screw conveyor* : 1500 mm
- Diameter Poros *screw conveyor* : 25 mm
- Kecepatan Putar *screw conveyor* : 11,5 rpm
- Kebutuhan Energi Pengeringan : 1.731,6 Watt
- Kebutuhan Energi Torefaksi : 2.381,3 Watt
- Totak Kebutuhan Energi : 4.112,9 Watt

Diagram skematik dari proses torrefaksi menggunakan reaktor tubular ditunjukkan pada gambar. Prosedur yang dilakukan dalam pengujian tandan kosong kelapa sawit (TKKS) selama proses torrefaksi dengan reaktor tubular melibatkan sampel yang keluar dari sisi tabung reaktor.

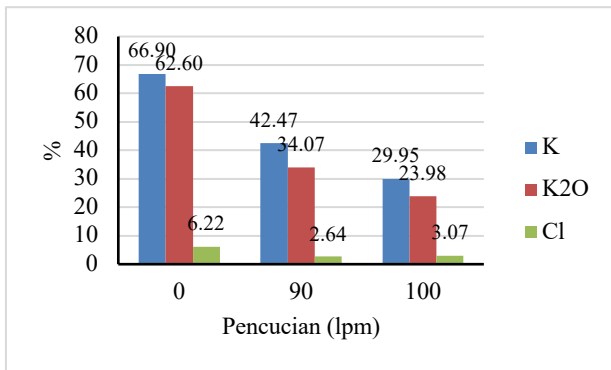


Gambar 3. Skema Reaktor Tubular

## HASIL DAN PEMBAHASAN

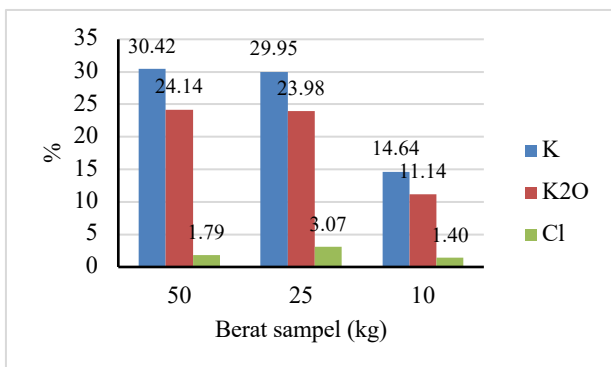
### Pencucian Tandan Kosong Kelapa Sawit

Pencucian tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dilakukan dengan mengalirkan air gambut pada laju aliran 80, 90, dan 100 liter per menit (lpm) dengan tujuan mengurangi kandungan kalium dan klorin dalam TKKS. Setelah proses pencucian, kandungan kalium dan klorin dalam TKKS menurun tajam, seperti yang terlihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Pengaruh laju pencucian terhadap kandungan TKKS

Kandungan kalium (K) dalam TKKS sebelum pencucian adalah 66,9%, tetapi setelah dicuci dengan air gambut pada laju aliran 90 lpm untuk TKKS dengan berat sampel 25 kg, kandungan kalium menurun menjadi 42,47%, dan pada laju aliran 100 lpm, kandungan kalium menjadi 29,95%. Tren yang sama diamati untuk kandungan kalium oksida (K<sub>2</sub>O), yang menurun dari 62,6% sebelum pencucian menjadi 34,07% dan 23,98% setelah pencucian, serta untuk kandungan klorin, yang menurun dari 6,22% sebelum pencucian menjadi 2,64% dan 3,07% setelah pencucian dengan air gambut.



Gambar 5. Pengaruh Berat Sampel Terhadap Kandungan TKKS

Proses pencucian dengan air gambut juga divariasikan untuk berat sampel yang berbeda, yaitu 50 kg, 25 kg, dan 10 kg, dengan laju aliran air gambut sebesar 100 liter per menit (lpm).

Kandungan kalium, kalium oksida, dan klorin untuk berat sampel 10 kg menurun hingga masing-masing 14,64%, 11,14%, dan 1,4%.

### Torrefaksi

Proses pengeringan dan torrefaksi dilakukan pada sampel tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan variasi massa sampel sebesar 10, 25, dan 50 kg pada suhu 300, 350, dan 400°C menggunakan reaktor tubular. Tabel 4.1 menunjukkan bahwa massa sampel akan berkurang setelah proses torrefaksi, dengan massa sampel terbesar setelah proses torrefaksi adalah 50 kg pada suhu 400°C, menghasilkan massa sebesar 7,1 kg. Sampel TKKS kelapa sawit yang telah ditorefaksi diuji menggunakan kalorimeter bom untuk menentukan nilai kalornya. Data yang digunakan untuk menghitung nilai kalor biokarbon ditampilkan dalam tabel.

Tabel 2. Data hasil pengujian

Ttor (°c)	M1 (kg)	M2 (kg)	Q (kkal/kg)	Mass yield (%)	Energy yield (%)
300	10	1	4489,95	10	25,62
	25	4,2	4234,13	16,8	40,58
	50	10	3924,15	20	44,78
350	10	0,8	4808,49	8	21,95
	25	3,2	4367,24	12,8	31,89
	50	8	4098,22	16	37,41
400	10	0,7	5047,32	7	20,16
	25	3	4510,22	12	30,88
	50	7,1	4327,52	14,2	35,06

## KESIMPULAN

Penelitian yang dilakukan berhasil mengurangi kandungan Kalium, Kalium Oksida, dan Klorin masing-masing hingga 14,64%, 11,14%, dan 1,4%.

Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa rata-rata nilai kalor cenderung menurun seiring dengan peningkatan massa yang diproses, menunjukkan bahwa proses torrefaksi lebih efisien pada massa yang lebih kecil. Pada massa 10 kg, diperoleh nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan massa 25 kg dan 50 kg. Sampel TKKS pada suhu 300, 350, dan 400°C diuji dengan massa 10, 25, dan 50 kg. Nilai kalor biokarbon tertinggi diperoleh pada suhu 400°C untuk massa 10 kg dengan hasil eksperimen sebesar 5047,32 Kkal/kg, hasil massa sebesar 7%, dan hasil energi sebesar 20,16%.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adistia, N. A., Nurdiansyah, R. A., Fariko, J., Vincent, V., & Simatupang, J. W. (2020).

- Potensi energi panas bumi, angin, dan biomassa menjadi energi listrik di Indonesia. *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, 22(2), 105-116.
- [2] Amrullah, A. P. I. P., Syarief, A., & Saifudin, M. (2020). Combustion behavior of fuel briquettes made from Ulin wood and Gelam wood residues. *International Journal of Engineering*, 33(11), 2365-2371.
- [3] Annisa, R., Hersanti, E. S., Pramono, A., Saleh, M., Sutarta, E. S., Setiawati, E., Sosiawan, H., Sutriadi, M. T., & Husnain. (2021). Biochar-Kompos Berbasis Limbah Kelapa Sawit: Bahan Amandemen untuk Memperbaiki
- [4] Apriyanto, A., Amrul, & Amrizal. (2021). Rancang Bangun dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas Oil Jcket. *Jurnal Mechanical*, 9(2), 54-66.
- [5] Arfiana, A., Finalis, E. R., Noor, I., & Murti, S. D. S. (2021). Oil palm empty fruit bunch ash as a potassium source in the synthesis of NPK fertilizer.
- [6] Bi, Y., Chen, C., Huang, Y., Huang, H. (2021). Review on Slagging Evaluation Methods of Biomass Fuel Combustion. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155.
- [7] Awang, A. H., Abdulrazik, A., Dahawi, Y., & Nafsun, A. I. (2023) Integration Analysis of Torrefied Empty Fruit Bunch as Feedstock to Biomass-Based Power Generation Plants. *Chemical Engineering & Technology*.
- [8] Budijono, B., Hardjoyudanto, Y., & Sibagariang, R. D. R. (2021). Peningkatan ekonomi masyarakat Kota Pekanbaru melalui produksi serbuk penjernih air gambut. *Journal of Rural and Urban Community Empowerment*, 3(1), 5-13.
- [9] Ekayuliana, A., & Hidayati, N. (2020). Analisis Nilai Kalor dan Nilai Ultimate Briket Sampah Organik Dengan Bubur Kertas. *Jurnal Mekanik Terapan*, 1(2), 107-115.
- [10] Hamid, S., Aladin, A., Modding, B., Syarif, T., Wiyani, L., & Arman, M. (2023). Pengaruh Gas Inert Nitrogen Yang Dialirkan Secara Kontinyu ke Dalam Reaktor Pirolisis Limbah Biomassa Serbuk Gergaji Batang Kelapa (*Cocos nucifera*) Terhadap Nilai Kalor Charcoal yang di Hasilkan. *Journal of Chemical Process Engineering*, 8(1), 1-6.
- [11] Harahap, M. A., Haeruman, A., & Mokheimer, E. (2023). Optimal Composition of Palm Oil Biomass to Minimize Biomass Power Plants' Greenhouse Gases Emission. *ASME Open Journal of Engineering*, 2.
- [12] Hariana, Prismantoko, A., Ahmadi, G. A., & Darmawan, A. (2021). Ash evaluation of Indonesian coal blending for pulverized coal-fired boilers. *Journal of Combustion*, 2021, 1-15.
- [13] Harnowo, S., & Yunaidi, Y. (2021). Kinerja Boiler dengan Sistem Pembakaran Bersama antara Ampas Tebu dengan Sekam Padi dan Cangkang Kelapa Sawit. *Semesta Teknika*, 24(2), 102-110. <https://doi.org/10.18196/st.v24i2.12937>
- [14] Haryanto, H., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., and Hidayat, W. (2021a). Biomass Fuel from Oil Palm Empty Fruit Bunch Pellet: Potential and Challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 8 (1) : 33-42.
- [15] Ipung, M. S. A., & Thamrin, S. (2023). Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Alternatif Energi Masa Depan. *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat Nusantara*, 4(3), 2427-2435.
- [16] Ismail, Pane E. A., Lesmana I. G. E., Hartrantie, R. C., & Rifki, D. (2022). Pengaruh Proses Torefaksi terhadap Kualitas Serbuk Kayu. *JTEP: Jurnal Keteknikan Pertanian*, 10(1), 11-2
- [17] Krylova, A. Y., Gorlov, E. G., & Shumovskii, A. V. (2019). Production of *Biocoal* by the Pyrolysis of Biomass. *Solid Fuel Chemistry*, 53, 369-376.
- [18] Lee, SY, Sankaran, R., Chew, KW, Tan, CH, Krishnamoorthy, R., Chu, DT, & Show, PL (2019). Mengubah limbah menjadi bioenergi: tinjauan teknologi konversi terkini. *Bmc Energy*, 1 (1), 1-22.
- [19] Legino, S., Hidayawanti, R., & Wirantika, I. (2019, July). Waste as fastest cycle of renewable energy sources through TOSS Model. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1282, No. 1, p. 012041). IOP Publishing.
- [20] Martin, A., Utama, Y. S., Ginting, Y. R., & Khotimah, N. (2022). Improvement of *Biocoal* Quality from Empty Oil Palm Fruit Bunches by Using Peat Water to Reducing Potassium Content and Torrefaction at 300°C to Increasing Heating Value. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Science*, 90(2), 32-41.

- [21] Matali, S., Rahman, N. A., Idris, S. S., Yaacob, N., & Alias, A. B. (2016). Lignocellulosic Biomass Solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction. *Procedia Engineering*, 148, 671-678.
- [22] Mkhwanazi, Z., Isa, Y. M., & Vallabh, S. T. (2023). Production of *Biocoal* from Wastewater Sludge and Sugarcane Bagasse: A Review. *Atmosphere*, 14(1), 184.
- [23] Muin, Syamsir.A. (2018), *Pesawat-pesawat Konversi Energi I (Ketel Uap)*, Edisi pertama, Cetakan 4, Rajawali, Jakarta
- [24] Muslim, M. B., Saleh, S., & Samad, N. A. F. A. (2017). Torrefied biomass gasification: A simulation study by using empty fruit bunch. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 131, p. 03008). EDP Sciences.
- [25] Nelly, N., Yana, S., Radhiana, R., Hanum, F., Fitriana, F., Juwita, J., & Kasmaniar, K. (2023). Potensi Ekonomi Energi Terbarukan Biomassa: Permasalahan dan Kendala Pengembangannya. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(3).
- [26] Niu, Y., Lv, Y., Lei, Y., Liu, S., Liang, Y., Wang, D., & Hui, S. (2019). Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115(September), 109395. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109395>
- [27] Parinduri, L., & Parinduri, T. (2020). Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 5(2), 88–92.
- [28] Paredes-Sánchez, B. M., Paredes-Sánchez, J. P., & García-Nieto, P. J. (2020). Energy multiphase model for *biocoal* conversion systems by means of a nodal network. *Energies*, 13(11), 2728.
- [29] Praevia, M. F., & Widayat. (2022). Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Cofiring pada PLTU Batubara. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 3(1), 28-37.
- [30] Rezki, A. S., Wulandari, Y. R., Alvita, L. R., & Sari, N. P. (2023). Potensi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebagai Bioenergi pada Produksi Bio-Oil dengan Metode Pirolisis: Efek Temperatur: Potential of Empty Fruit Bunches (TKKS) Waste as Bioenergy to Produce Bio-Oil Using Pyrolysis Method: Temperature Effects. *Jurnal Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*, 7(1), 22-29.
- [31] Rusdianasari, R., Arissetyadhi, I., Kalsum, L., Bow, Y., Syarif, A., & Arifin, F. (2023). Characterization of Empty Fruit Bunch of Palm Oil as Co-firing Biomass Feedstock. *AJARCODE (Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment)*, 7(1), 74-78.
- [32] Salimbeni, A. (2019). Organic waste streams upgrading for gasification process optimization. In *Substitute Natural Gas from Waste* (pp. 75-103). Academic Press.
- [33] Subekti, P., Elfiano, E., Saleh, A. R., & Pranoto, S. (2022). Identifikasi Potensi Sumber Energi Berkelanjutan Berbasis Tanaman Perkebunan dari Suku Areaceae Menggunakan AHP dengan Aplikasi Expert Choice. *Aptek*, 42-48.
- [34] Sukarta, I. N., & Oka, L. P. A. L. (2017). Analisis Proksimat pada Pelet Bahan Bakar dari Kotoran Babi yang Dikombinasikan dengan Limbah Kayu. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 6(2), 220-227.
- [35] Suwanto, N., Sudarno, Sari, A. A., & Harimawan. (2017). Penyisihan Fe, Warna, dan Kekeruhan pada Air Gambut Menggunakan Metode Elektrokoagulasi. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(2), 1-12.
- [36] Syamsiro, M. (2016). Peningkatan kualitas bahan bakar padat biomassa dengan proses densifikasi dan torrefaksi. *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, 1(1), 7-13.
- [37] Wadchasit, P., Suksong, W., Sompong, O., & Nuithitikul, K. (2021). Development of a novel reactor for simultaneous production of biogas from oil-palm fruit bunches (TKKS) and palm oil mill effluents (POME). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105209.
- [38] Wenas, A. A., & Hardianto, T. (2022). Pengaruh Torefaksi terhadap Pencucian Potassium dalam Konversi Tandan Kosong Kelapa Sawit menjadi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan. *JMPM (Jurnal Material Dan Proses Manufaktur)*, 5(2), 123–140. <https://doi.org/10.18196/jmpm.v5i2.14109>
- [39] Windiastuti, E., Bindar, Y., & Hasanudin, U. (2022, July). Identification of potential application of oil palm empty fruit bunches (TKKS): a review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1063, No. 1, p. 012024). IOP Publishing.