

Peningkatan Kualitas Biobriket dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Melalui Torefaksi dengan Penambahan *Co-Firing* dari Tempurung Kelapa dan *Sludge* CPO sebagai Perekat

Zuqni Meldha^a, Idral Amri^{b*}, Aulia Ramadhani^a, Indra Abidayu Sagala^a,
Nirwana^a, Dedy Anwar^{c,d}, Meutia Mirnandaulia^e

^aProgram Studi S1 Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

^bProgram Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

^cProgram Studi Doktor Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 55281, Indonesia

^dProgram Studi Teknik Bioproses, Institut Teknologi Del, Sumatera Utara 22381, Indonesia

^eProgram Studi Agribisnis Kelapa Sawit, Politeknik Teknologi Kimia Industri Medan, Medan 20228, Indonesia

ARTICLE HISTORY

Received : 29-10-2023

Accepted : 23-11-2023

Published : 28-11-2023

KEYWORDS

Torrefaction

Briquette

Co-Firing

Heating Value

*correspondence author:

Email: idal_amri@eng.unri.ac.id



ABSTRACT

Indonesia is one of the world's leading producers of crude palm oil. This large production, however, creates a huge quantity of waste, one of which is empty palm fruit bunches. These empty fruit bunches have a high potential for use as a renewable energy source, such as in the creation of briquettes employing the torrefaction process with co-firing addition, with the goal of increasing their heating content. Furthermore, the goal of this research is to determine the best composition of co-firing with variation adhesive addition for increasing heating value and to compare the heating value, ash content, and volatile matter content of various compositions of co-firing. The study began with the preparation of raw material samples of empty palm fruit bunches and coconut shells. Torrefaction at 300°C for one hour is utilized. The torrefaction results are produced into briquettes with a variety of compositions of empty palm fruit bunches and coconut shells. CPO sludge is also used as an adhesive with concentrations of 20% and 30%. The briquettes produced with an addition co-firing from coconut shells fulfilled SNI requirements such as heating value, moisture content, volatile matter, and ash content. The best briquette quality is composed of 40% empty palm fruit bunches and 40% coconut shell, with a heating value of 6241.26 cal/g, 3.15% moisture, 5.8% ash, and 9.9% volatile matter.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan ekonomi yang pesat menyebabkan peningkatan konsumsi energi dan sebagian besar sektor diperkirakan akan tetap menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utamanya (Pari dkk., 2023). Sekitar 81,4% bahan bakar fosil digunakan sebagai energi yang paling utama dan sisanya berasal dari biomassa (Coleti dkk., 2020). Penggunaan bahan bakar fosil berdampak signifikan terhadap lingkungan karena tingkat emisi yang tinggi dan berasal dari bahan-bahan yang tidak terbarukan (Pari dkk., 2023). Emisi bahan bakar fosil dalam proses pembakaran menghasilkan CO₂ sekitar 21,3 miliar metrik ton per tahun serta gas rumah kaca lainnya (Saleem, 2022). Oleh karena itu, mencari sumber energi alternatif yang terbarukan, berkelanjutan, dan ramah lingkungan sangatlah penting.

Salah satu sumber energi alternatif terbarukan berasal dari biomassa. Selama bertahun-tahun, terdapat minat yang besar terhadap energi yang berasal dari biomassa karena mempunyai kelebihan seperti bahan baku yang melimpah, berbiaya rendah, dan berkelanjutan (Moodley dan Trois, 2021). Di Indonesia, ketersediaan bahan baku untuk menghasilkan energi berbasis biomassa cukup melimpah (Hardhi, 2022). Sumber biomassa di Indonesia berasal dari

berbagai jenis seperti kelapa sawit, tebu, pohon karet, sekam padi, kelapa, jagung, singkong, kayu, ternak, dan sampah (Nyoman dan Kumara, 2020). Sebagian besar bahan baku penghasil energi tersebut berasal dari biomassa minyak kelapa sawit. Hal ini dikarenakan Indonesia adalah penghasil *Crude Palm Oil* (CPO) terbesar di dunia. Jumlah CPO yang dihasilkan dari suatu industri sebanding dengan jumlah limbah yang dihasilkan. Dalam produksi CPO, limbah yang dihasilkan berupa tandan kosong kelapa sawit, cangkang kelapa sawit, serabut kelapa sawit, dan pelepah kelapa sawit (Mahidin dkk., 2020). Setiap ton tandan buah segar kelapa sawit akan menghasilkan 200-300 Kg tandan kosong kelapa sawit, 50-60 Kg cangkang kelapa sawit, 120-130 serabut kelapa sawit dan 0,77-0,84 m³/ton limbah pabrik kelapa sawit (Haryanto dkk., 2021). Dari seluruh sampah di atas, tandan kosong kelapa sawit merupakan sampah yang paling banyak dihasilkan. Mengubah tandan kosong kelapa sawit ini menjadi bahan bakar biobriket dapat menjadikannya lebih bernilai.

Masyarakat mulai menemukan berbagai cara untuk mendapatkan bahan limbah pertanian, seperti batok kelapa, daun lontar, dan lain-lain, yang dapat digunakan untuk membuat briket. Namun, energi yang dihasilkan briket jauh lebih sedikit dibandingkan energi yang dihasilkan bahan bakar fosil seperti gas atau minyak tanah. Oleh karena itu, perlu dilakukan peningkatan kualitas briket tersebut dengan menggunakan metode torefaksi dengan penambahan *co-firing* untuk meningkatkan nilai kalor. Selain itu, keuntungan dalam penambahan *co-firing* ini memiliki stabilitas pembakaran yang tinggi dan hasil emisi pembakaran yang lebih rendah (Sukma dkk., 2023).

Proses torefaksi yang digunakan dalam penelitian ini adalah proses pemanasan bahan lignoselulosa dan mengubahnya menjadi zat yang kaya karbon (Waheed dkk., 2022). Proses torefaksi dilakukan pada suhu antara 150°C hingga 350°C. Suhu torefaksi bergantung pada sumber bahan baku yang digunakan karena bahan baku yang berbeda akan mempunyai perilaku yang berbeda ketika mengalami pemrosesan termal (Akogun dan Waheed, 2022). Kebutuhan energi untuk proses ini juga lebih rendah dibandingkan proses pirolisis (Waheed dkk., 2022). Selain itu jika dibandingkan proses pirolisis dan gasifikasi, torefaksi adalah salah satu teknologi yang ramah lingkungan dan lebih hemat (Matsakas et al., 2017). Di dalam proses gasifikasi dan pirolisis, suhu operasionalnya lebih tinggi, memerlukan lebih banyak energi, dan dibutuhkan peralatan pemisahan gas yang biayanya tinggi dan teknologi untuk menghilangkan partikel-partikelnya. Pada pembuatan briket ini juga dilakukan penambahan perekat. Perekat yang digunakan adalah berasal dari *sludge* CPO. Perekat yang ditambahkan pada penelitian ini diharapkan akan dapat menambah ikatan antar dua permukaan bahan yaitu TKKS dan *co-firing*. Sehingga akan membentuk struktur yang padat ketika digabungkan.

2. METODE

2.1 Alat dan bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah tandan kosong kelapa sawit dengan *co-firing* yaitu tempurung kelapa. *CPO sludge* juga digunakan dalam penelitian ini yang berfungsi sebagai perekat yang diambil dari kolam limbah PTPN V Sei Pagar, Kabupaten Kampar, Provinsi Riau, Indonesia. Perbandingan bahan antara tandan kosong kelapa sawit dengan *co-firing* pada penelitian ini adalah 70%:10%, 60% :20%, 50%:30%, dan 40%:40%, serta perekat yang digunakan untuk masing-masing sampel adalah 20%. Peralatan yang digunakan adalah

neraca analitik, ayakan, oven, desikator, reaktor torefaksi, alat pencetak briket, tungku tabung dan *bom calorimeter*. Pada penelitian ini juga dilakukan analisis nilai kalor dengan menggunakan *bom calorimeter*. Kemudian nilai kalornya dihitung berdasarkan SNI 01-6235-2000. Untuk analisis kadar air menggunakan ASTM D-3173, kadar abu ASTM D-3174-04 dan *volatile matter* ASTM D- 3175-02.

2.2 Prosedur Penelitian

2.2.1 Persiapan Bahan Baku

Tandan kosong kelapa sawit dan tempurung kelapa dikeringkan di dalam oven dengan suhu 40°C selama 12 jam hingga kadar air berkurang menjadi 10%. Kemudian sampel dipotong dengan ukuran ± 2 cm, dilanjutkan dengan proses torefaksi yang dilakukan selama 1 jam pada suhu 300°C (Nyakuma dkk., 2015). Untuk *CPO sludge*, sampel disaring dengan ayakan 100 mesh. Setelah itu sampel dikeringkan dalam oven dengan suhu 100°C selama 12 jam untuk menurunkan kadar air kurang hingga 10% (Tanuwijaya dkk., 2020). Kadar air bahan baku selanjutnya ditentukan dengan menggunakan metode perhitungan sebagai berikut:

$$\% \text{ Moisture Content} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

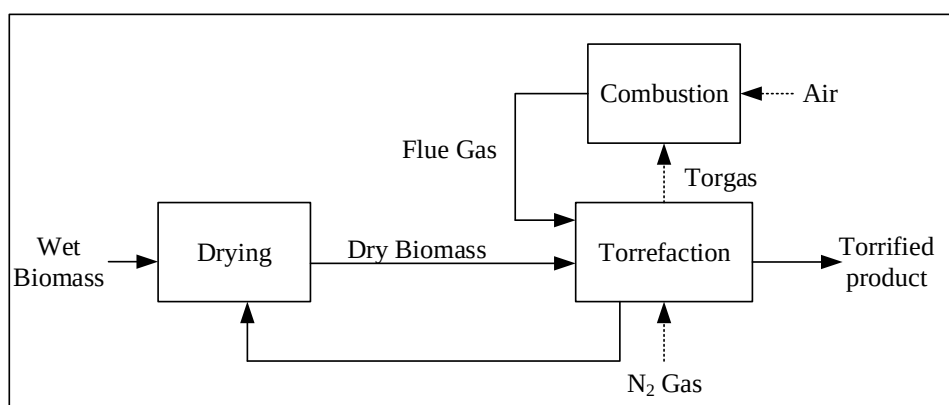
Keterangan:

W_i : Berat material sebelum dikeringkan (g)

W_f : Berat material setelah dikeringkan (g)

2.2.2 Proses Torefaksi

Bahan baku yang telah kering dipanaskan dengan menggunakan proses torefaksi. Pada proses ini, tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan tempurung kelapa dimasukkan ke dalam furnace dan ditorefaksi pada suhu 300°C selama 1 jam. Torefaksi dapat dilakukan tanpa adanya oksigen atau di lingkungan dengan oksidasi minimal (Conag dkk., 2018). Selama torefaksi, laju pemanasan adalah 50°C/menit. Hal ini akan meningkatkan hasil padatan yang maksimal (Waheed dkk., 2022). Diagram alir proses torefaksi disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Torefaksi (Yun dkk., 2021)

Setelah torefaksi, seluruh sampel dihaluskan dan disaring menggunakan ayakan 100 mesh (Lestari dkk, 2010). Kemudian sampel dicampur dengan perbandingan TKKS dan *co-firing* sebesar 70%:10%, 60% :20%, 50%:30%, dan 40%:40% untuk konsentrasi perekat 20%

dan 65%:5%, 55%:15%, 45%:25%, dan 35%:35% untuk konsentrasi perekat 30%. Setelah itu sampel briket akan dicetak dalam bentuk pelet dan ditentukan kualitasnya seperti nilai kalor dengan analisa, kadar air, zat mudah menguap, dan kadar abu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi Bahan Baku

Setelah dilakukan persiapan sampel seperti TKKS, lumpur CPO, dan *co-firing* (tempurung kelapa), dilakukan karakterisasi sampel. Parameter yang diamati dalam karakterisasi adalah nilai kalor, kadar air, bahan mudah menguap, dan kadar abu. Hasil analisis disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Bahan Baku

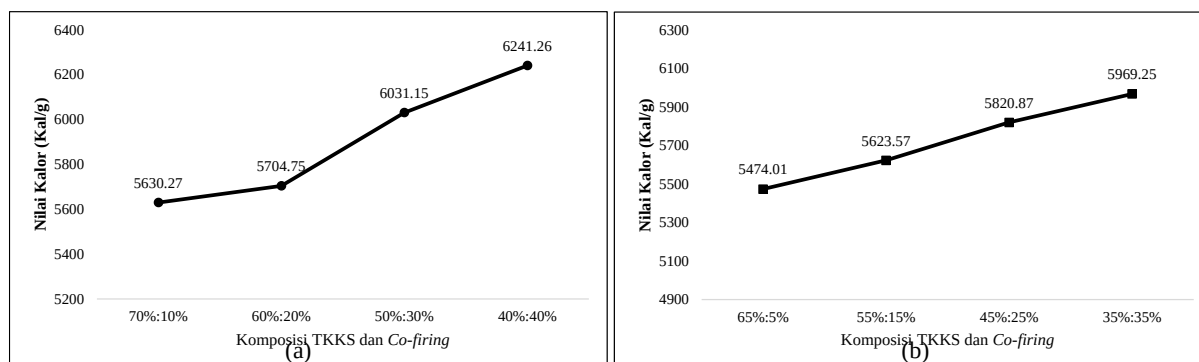
Material	Nilai Kalor (kal/g)	Moisture content (%)	Volatile matter (%)	Ash content (%)
TKKS	5099,15	7,87	30,19	7,80
CPO Sludge	4468,05	30,40	37,91	9,60
Tempurung Kelapa	6963,96	3,45	10,04	3,98

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa tempurung kelapa mempunyai nilai kalor tertinggi sebesar 6963,955 kal/g serta kandungan *volatile matter* dan *ash content* yang rendah. Tingginya kandungan C pada tempurung kelapa menyebabkan tempurung kelapa mempunyai nilai kalor yang tinggi. Tempurung kelapa memiliki komposisi kimia 74,3% karbon, 21,9% oksigen, 0,25% silika, 1,4% kalium, 0,5% sulfur, dan 1,7% fosfor (P) (Kusmartono dkk., 2021).

3.2 Pengaruh Konsentrasi CPO Sludge Terhadap Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan suatu angka untuk menentukan kualitas briket, dimana semakin tinggi nilai kalor maka semakin baik pula kualitas briket yang dihasilkan. Nilai kalor yang diperoleh dari briket TKKS kelapa sawit dengan *co-firing* dari tempurung kelapa ditunjukkan pada Gambar 2.

Dari Gambar 2a dan 2b, peningkatan konsentrasi tempurung kelapa pada briket akan membuat nilai kalor briket semakin meningkat. Pada Gambar 2a, nilai kalor tertinggi sebesar 6241,26 kal/g diperoleh pada briket dengan konsentrasi TKKS kelapa sawit sebesar 40% dan tempurung kelapa sebesar 40% serta konsentrasi perekat sebesar 20%. Hasil yang sama juga terjadi pada konsentrasi perekat 30% (Gambar 2b). Nilai kalor tertinggi briket sebesar 5969,25 kal/g dan konsentrasi TKKS kelapa sawit 35% dan tempurung kelapa 35%. Nilai kalor yang diperoleh pada kedua konsentrasi perekat sudah baik karena untuk standar SNI briket untuk nilai kalor adalah minimal 5000 kal/g. Menurut Putri dan Andasuryani (2017), peningkatan kandungan karbon akan membuat nilai kalor briket meningkat. Bila komposisi briket memiliki kandungan karbon yang lebih rendah maka nilai kalornya akan menurun karena proses pembakaran memerlukan karbon untuk bereaksi dengan oksigen sehingga menghasilkan panas.



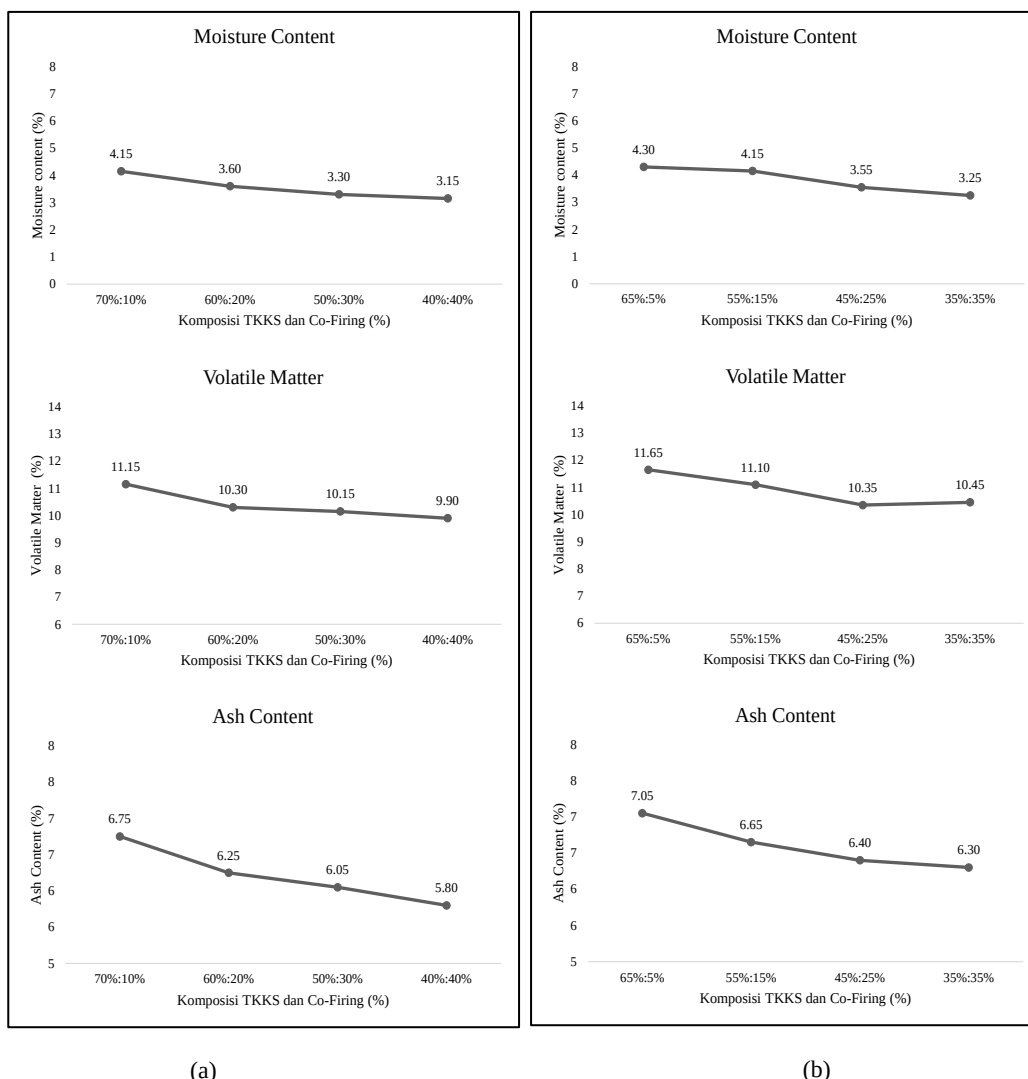
Gambar 2. Pengaruh nilai kalor terhadap briket TKKS kelapa sawit dengan *co-firing* dari tempurung kelapa. (a) Briket dengan perekat CPO sludge 20% (b) Briket dengan perekat CPO *sludge* 30%

Bahan perekat yang digunakan dalam briket juga mempengaruhi nilai kalor. Peningkatan konsentrasi bahan perekat akan menurunkan nilai kalor. Semakin banyak jumlah perekat yang digunakan dalam briket maka semakin besar pula kadar air briket tersebut. Hal ini terjadi karena air yang terdapat pada perekat akan masuk ke pori-pori briket dan menyebabkan kadar air meningkat (Pujiastuti dkk., 2022).

3.3 Pengaruh konsentrasi CPO *Sludge* terhadap *Moisture content*, *Ash content* dan *volatile matter*

Konsentrasi CPO *sludge* sangat mempengaruhi *moisture content*, *ash content* dan *volatile matter* sangat mempengaruhi kualitas briket yang dihasilkan yaitu nilai kalor dan laju pembakaran (Mokodompit, 2011). Pengaruh konsentrasi perekat dari CPO *sludge* dapat dilihat pada Gambar 3. Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa semakin tinggi konsentrasi perekat akan meningkatkan kadar air dalam briket. Kadar air yang tinggi akan menyebabkan rendahnya nilai kalor dan laju pembakaran. Hal tersebut dikarenakan panas yang diberikan digunakan terlebih dahulu untuk menguapkan air yang terdapat di dalam briket. Kemudian hal tersebut akan menyebabkan briket menjadi cepat rusak (Chusniyah dkk., 2022). Konsentrasi perekat yang tinggi akan membuat briket menjadi lebih padat yang akan memperkecil ukuran pori – pori briket. Sehingga air yang tersisa didalam pori – pori briket akan sulit untuk menguap setelah proses pengeringan. Nilai kadar air yang diperoleh pada penelitian ini sudah sesuai dengan standar SNI (No.1/6235/2000) yaitu dibawah 8%.

Untuk *volatile matter* atau zat terbang, briket dengan perekat 20% lebih kecil dibanding briket dengan perekat 30%. Jumlah *volatile matter* didalam briket akan mempengaruhi kesempurnaan proses pembakaran dan panas pembakaran. Hal ini bergantung kepada perbandingan antara kandungan *fixed carbon* dan *volatile matter* yang disebut *fixed ratio*. Tingginya nilai *fixed ratio* akan menyebabkan semakin banyak karbon dalam briket yang tidak terbakar (Huseini dkk., 2018). Nilai *volatile matter* yang diperoleh pada penelitian ini sudah sesuai dengan standar SNI (No.1/6235/2000) yaitu dibawah 15% untuk masing-masing perekat.



Gambar 3. Pengaruh konsentrasi perekat terhadap *moisture content*, *volatile matter* dan *ash content*. (a) Briket dengan perekat CPO *sludge* 20% (b) Briket dengan perekat CPO *sludge* 30%

Kemudian pengaruh konsentrasi perekat terhadap kadar abu atau *ash content* adalah kadar abu yang tinggi akan menyebabkan berkurangnya nilai kalor. Pada penelitian yang dilakukan perekat dengan konsentrasi 30% lebih besar kadar abunya dibandingkan dengan perekat dengan konsentrasi 20%. Hal ini disebabkan oleh abu terdiri dari senyawa besi, sulfat dan fosfat yang mana semakin besar konsentrasi perekat akan menyebabkan semakin tinggi pula abu yang akan dihasilkan (Huseini dkk., 2018). Nilai kadar abu yang diperoleh pada penelitian ini sudah sesuai dengan standar SNI (No.1/6235/2000) yaitu dibawah 8%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini diperoleh nilai kalor tertinggi 6241,26 kal/g yang mana konsentrasi perekat dari CPO *sludge* yang digunakan adalah 20% dan komposisi bahan baku antara TKKS dan *co-firing* adalah 40%: 40%. Komposisi tersebut memiliki *moisture content* 3,15%, *volatile matter* 9,9% dan *ash content* 5,8%. Komposisi briket ini telah memenuhi

standar nasional (SNI) briket arang kayu (No.1/6235/2000) untuk nilai kalor, kadar air, kadar zat menguap dan kadar abu.

DAFTAR PUSTAKA

- Akogun, O.A., & Waheed, M.A. (2022). Development And Performance Evaluation of a Piston Type Hydraulically Operated Briquetting Machine with Replaceable Moulds. *Agricultural Engineering International*, 24 (1), 113–127.
- Atan, N.A., Nazari, M.M, & Azizan, F.A. (2018). Effect of Torrefaction Pre-Treatment on Physical and Combustion Characteristics of Biomass Composite Briquette from Rice Husk and Banana Residue. *MATEC Web of Conferences*, 150 (06011).
- Chusniyah, D.A., Pratiwi, R., Benyamin, & Suliestiyah. (2022). Uji Kualitas Briket Berbahan Arang Ampas Kelapa Berdasarkan Nilai Kadar Air. *Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, 7 (1), 14 – 23.
- Coleti, J.L., Manfredi, G.V.P., Vinhal, J.T., Junca, E., Espinosa, D.C.R., & Tenorio, J.A.S. (2020). Kinetic Investigation of Self-Reduction Basic Oxygen Furnace Dust Briquettes Using Charcoals from Different Biomass. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(20), 13282-13293.
- Conag, A.T., Villahermosa, J.E.R., Cabatingan, L.K., & Go, A.W. (2018). Energy Densification of Sugarcane Leaves Through Torrefaction Under Minimized Oxidative Atmosphere. *Energy Sustainable Development*, 42, 160–169.
- Hardhi, M. (2022). *Indonesia Post-Pandemic Outlook: Strategy Towards Net-Zero Emissions By 2060 From the Renewables and Carbon-Neutral Energy Perspectives*. BRIN Publishing.133-158.
- Haryanto, A., Nita, R., Telaumbanua, M., Suharyatun, S., Hasanudin, U., Hidayat, W., Iryani, D.A., Triyono, S., Amrul, & Wisnu, F.K. (2021). Torrefaction to Improve Biomass Pellet Made of Oil Palm Empty Fruit Bunch. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 749 (012047).
- Huseini, F., Solihin, & Pramusanto. (2018). Kajian Kualitas Batubara Berdasarkan Analisis Proksimat, Total Sulfur dan Nilai Kalor Untuk Pembakaran Bahan Baku Semen di PT Semen Padang Kelurahan Batu Gadang, Kecamatan Lubuk Kilangan, Kota Padang Provinsi Sumatera Barat. *Prosiding Teknik Pertambangan*, 4(2); 668- 677.
- Kusmartono, B., Situmorang, A., & Yuniwati, M. (2021). Pembuatan Briket Dari Tempurung Kelapa (*Cocos Nucivera*) dan Tepung Terigu. *Jurnal Teknologi*, 14(2), 142-149.
- Lestari, L., Aripin., Yanti., Zainudin., Sukmawati., & Marliani. (2010). Analisis Kualitas Briket Arang Tongkol Jagung Yang Menggunakan Bahan Perekat Sagu dan Kanji. *Jurnal Aplikasi Fisika*, 6 (2), 93–96.
- Mahidin, Saifullah, Erdiwansyah, Hamdani, Hisbullah, Hayati, A.P., Zhafran, M., Sidiq, M.A., Rinaldi, A., Fitria, B., Tarisma, R., & Bindar, Y. (2020). Analysis of Power from Palm Oil Solid Waste for Biomass Power Plants: A Case Study in Aceh Province. *Journal of Chemosphere*, 253 (126714).
- Matsakas, L., Jansson, S., Gao, Q., & Rova, U. (2017). Green Conversion of Municipal Solid Wastes into Fuels and Chemicals. *Electronic Journal of Biotechnology*, 26, 69-83.
- Mokodompit, M. (2011). Pengujian Karakteristik Briket (Kadar Abu, Volatile Matter, Laju Pembakaran) Berbahan Dasar Limbah Bambu Menggunakan Perekat Limbah Nasi. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia.
- Moodley, P., & Trois, C. (2021). 2 - Lignocellulosic Biorefineries: The Path Forward. In *Applied Biotechnology Reviews. Sustainable Biofuels*, Academic Press. 21-42.

- Nyakuma, B. B., Arshad, A., Anwar, J., Tuan, A. T. A., & Olagoke, O. (2015). Torrefaction of Pelletized Oil Palm Empty Fruit Bunches. *The 21st International Symposium on Alcohol Fuels*, 1-6.
- Nyoman, I., & Kumara, S. (2020). A Review on Biomass for Electricity Generation in Indonesia Municipal Solid Waste Management View Project Lontar Reconstruction View Project. *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, 4(1), 1-9.
- Pari, G., Efiyanti, L., Darmawan, S., Saputra, N.A., Hendra, D., Adam, J., Inkriwang, A., & Effendi, R. (2023). Initial Ignition Time and Heating Value Enhancement of Briquette with Added Pine Resin. *Journal of Korean Wood Science and Technology*, 51(3), 207-221.
- Pujiastuti, C., Maulidian, O., Wahyuni, P.N., & Sunarti, A.R.Y. (2022). The Effect of Variation of Raw Materials and Addition of Molasses Adhesive on the Quality of Blotong Bricket. 3rd International Conference Eco-Innovation in Science, Engineering, and Technology. *Nusantara Science and Technology Proceedings*, 200-205.
- Putri, R.E., & Andasuryani. (2017). Studi Mutu Briket Arang dengan Bahan Baku Limbah Biomassa. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*, 21(2), 143-151.
- Saleem, M. (2022). Possibility of Utilizing Agriculture Biomass as a Renewable and Sustainable Future Energy Source. *Journal of Heliyon*, 8(2).
- Sukma, A.A., Padil, & Fadli, A. (2023). Analisa Spesifikasi Fluff, Pellet, dan Bricket Pelepah Kelapa Sawit sebagai Biomassa Co-firing untuk Pembangkit Listrik. *Journal of the Bioprocess, Chemical, and Environmental Engineering Science*, 4(1), 8-18.
- Tanuwijaya, M., Amri, I., & Zultiniar. (2020). Pembuatan Briket Kalori Tinggi Menggunakan Limbah Pulp dan Tempurung Kelapa Sebagai Cofiring dengan Campuran Limbah Sludge CPO sebagai Bahan Perikat. *Journal of the Bioprocess, Chemical, and Environmental Engineering Science*, 1(2), 25-38.
- Waheed, M.A., Akogun, O.A., & Enweremadu, C.C. (2022). An Overview of Torrefied Bioresource Briquettes: Quality-Influencing Parameters, Enhancement Through Torrefaction and Applications. *Journal of Bioresources and Bioprocessing*, 9 (122).
- Yun, H., Wang, Z., Wang, R., Bi, X., & Chen, W.H. (2021). Identification of Suitable Biomass Torrefaction Operation Envelops for Auto-Thermal Operation. *Front. Energy Res.*, 9.