

Studi Eksperimental *Hydrothermal Carbonization* (HTC) Batang Tembakau untuk Optimasi Nilai Kalor: Pengaruh Temperatur dan *Residence Time*

Asroful Abidin^{1*}, Nurhalim¹, Muhammad Zainur Ridlo¹, Fitriana Dina Rizkina²,
Latifa Mirzatika Al-Rosyid³, Firnanda Faiq Iswanto¹

¹Prodi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember
Jl. Karimata No. 49 Jember, Jawa Timur, Indonesia

²Bioresource Production Science Department, Ehime University
Matsuyama, Japan

³Prodi Teknik Lingkungan Universitas Muhammadiyah Jember
Jl. Karimata No. 49 Jember, Jawa Timur, Indonesia

*Corresponding author: asrofulabidin@unmuhjember.ac.id

Abstract

The increasing demand for renewable energy sources drives the development of biomass conversion technologies, one of which is Hydrothermal Carbonization (HTC). This study aims to investigate the effect of temperature and residence time variations on the calorific value of hydrochar produced from tobacco stem waste. A quantitative experimental approach was employed using na-oogst tobacco stems obtained from agricultural waste in Jember, East Java, Indonesia. The HTC process was conducted at temperatures of 120, 150, and 180°C, with residence times of 3 hours and 5 hours, respectively, while the calorific value was analyzed according to the ASTM D5865 standard method. The results showed that HTC treatment increased the calorific value from 3149.087 cal/g (raw material) to 3915.888 cal/g under optimal conditions at 180°C for 5 hours, with a 24.3% improvement. This study confirms that tobacco stems can be utilized as a highly potential alternative biomass source for renewable energy while supporting sustainable agricultural waste management efforts.

Keywords: biomass, hydrothermal carbonization, tobacco stems, calorific value

Abstrak

Kebutuhan akan sumber energi terbarukan mendorong pengembangan teknologi konversi biomassa, salah satunya melalui *Hydrothermal Carbonization* (HTC). Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi temperatur dan *residence time* terhadap nilai kalor *hydrochar* dari limbah batang tembakau. Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif dengan bahan baku batang tembakau jenis na-oogst dari Jember, Jawa Timur, Indonesia. Proses HTC dilakukan pada temperatur 120, 150, dan 180°C dengan *residence time* 3 jam dan 5 jam, serta analisis nilai kalor dilakukan berdasarkan metode ASTM D5865. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses HTC meningkatkan nilai kalor dari 3149,087 kal/g (bahan mentah) menjadi 3915,888 kal/g pada kondisi optimal 180°C selama 5 jam, dengan peningkatan sebesar 24,3%. Penelitian ini menegaskan bahwa batang tembakau dapat dimanfaatkan sebagai biomassa alternatif berpotensi tinggi untuk energi terbarukan, sekaligus mendukung upaya pengelolaan limbah pertanian yang berkelanjutan.

Kata kunci: biomassa, *hydrothermal carbonization*, batang tembakau, nilai kalor

1. Pendahuluan

Energi merupakan kebutuhan utama yang mendukung seluruh aktivitas manusia di berbagai sektor kehidupan. Ketersediaan energi yang berkelanjutan menjadi faktor kunci dalam menunjang pertumbuhan ekonomi, meningkatkan kualitas hidup, serta mendorong pembangunan industri dan transportasi modern [1], [2]. Dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil dan menanggulangi dampak perubahan iklim, berbagai sumber energi alternatif terus dikembangkan. Salah

satu sumber energi alternatif yang memiliki potensi besar adalah biomassa, yaitu bahan organik yang berasal dari sisa-sisa makhluk hidup, baik dari sektor pertanian, kehutanan, maupun limbah organik lainnya [3], [4].

Biomassa dapat dikonversi menjadi bahan bakar padat dengan nilai kalor tinggi melalui berbagai metode termal, seperti pirolisis, gasifikasi, torrefaksi, dan *Hydrothermal Carbonization* (HTC). Di antara metode tersebut, HTC dikenal sebagai teknologi yang efisien untuk meningkatkan kualitas biomassa basah

tanpa memerlukan proses pengeringan sebelumnya, sehingga lebih hemat energi dan biaya[5][6]. Proses HTC mampu menghasilkan *hydrochar*, yaitu bahan bakar padat dengan karakteristik nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan bahan asalnya. *Hydrochar* yang diperoleh dari proses HTC menunjukkan karakteristik serupa dengan batubara lignit, sehingga berpotensi sebagai bahan bakar padat dengan kandungan karbon dan nilai kalor yang tinggi[7]. Salah satu jenis biomassa yang berpotensi besar namun belum banyak dimanfaatkan secara optimal adalah limbah pertanian, seperti batang tembakau. Limbah batang tembakau yang selama ini lebih banyak dibuang atau dibakar secara terbuka, sebenarnya dapat dikonversi menjadi sumber energi terbarukan melalui teknologi HTC.

Namun, hingga saat ini terdapat beberapa kesenjangan pengetahuan yang perlu diisi. Pertama, pengaruh variasi temperatur dan *residence time* (waktu tinggal) dalam proses HTC terhadap nilai kalor batang tembakau masih belum banyak diteliti secara mendalam. Kedua, informasi mengenai kondisi operasi optimal untuk menghasilkan *hydrochar* berkualitas tinggi dari batang tembakau melalui proses HTC masih sangat terbatas. Ketiga, studi yang secara spesifik membahas karakteristik nilai kalor hasil HTC batang tembakau dengan kontrol terhadap temperatur dan *residence time* juga masih jarang ditemukan. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak berfokus pada jenis biomassa lain, seperti limbah kayu, jerami padi, atau limbah pertanian umum, tanpa mengkhhususkan perhatian pada batang tembakau. Oleh karena itu, potensi batang tembakau sebagai bahan baku energi terbarukan melalui proses HTC belum sepenuhnya dieksplorasi.

Upaya untuk mengisi kesenjangan ini menjadi penting guna menggali potensi limbah batang tembakau sebagai sumber energi terbarukan. Dengan memahami secara rinci pengaruh variasi temperatur dan *residence time* terhadap kualitas *hydrochar* yang dihasilkan, proses HTC dapat dioptimalkan untuk meningkatkan nilai kalor produk akhir secara lebih efektif. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kondisi operasi terbaik dalam proses HTC batang tembakau sehingga dapat menghasilkan *hydrochar* dengan nilai kalor maksimum. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya khazanah

literatur terkait teknologi energi terbarukan dari limbah pertanian serta memberikan kontribusi aplikatif dalam pengembangan bioenergi berbasis limbah tembakau. Dengan demikian, studi ini memiliki nilai strategis dalam mendukung transisi energi berkelanjutan sekaligus memberikan solusi inovatif dalam pengelolaan limbah pertanian, khususnya limbah batang tembakau.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan eksperimental berbasis kuantitatif untuk menyelidiki pengaruh variasi temperatur dan *residence time* dalam proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) terhadap nilai kalor batang tembakau.

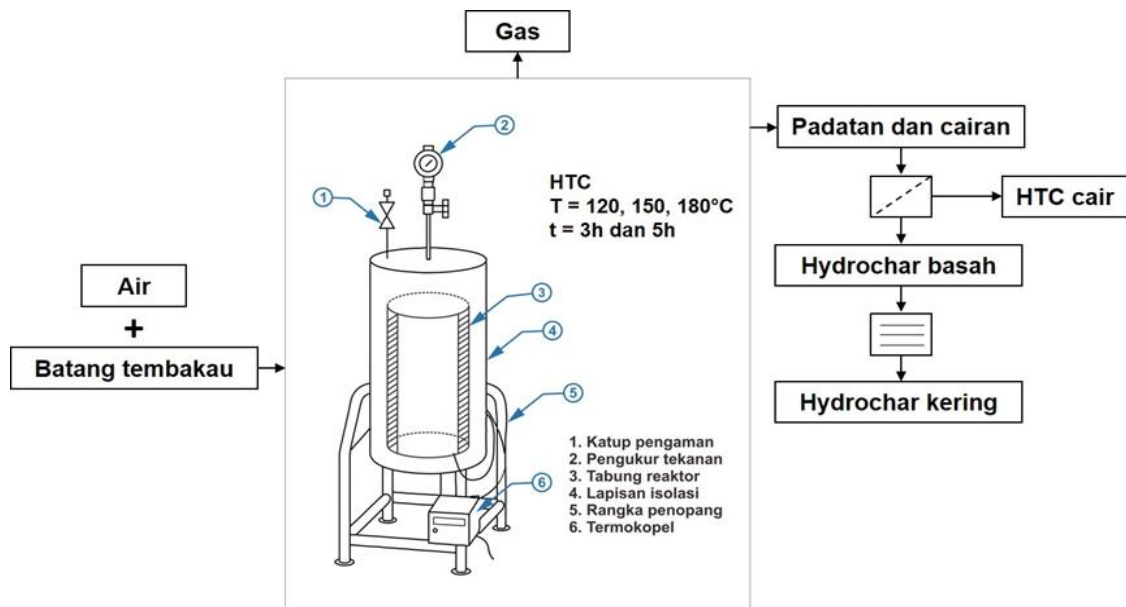
Bahan baku penelitian berupa batang tembakau jenis na-oogst yang diperoleh dari limbah pertanian di Jember, Jawa Timur, dengan metode purposive sampling yang mempertimbangkan homogenitas kondisi fisik bahan.

Peralatan utama yang digunakan meliputi reaktor HTC listrik bertekanan otomatis, termokopel digital untuk pengukuran temperatur, timer untuk pengaturan waktu tinggal, serta bom kalorimeter untuk pengujian nilai kalor produk HTC.

Tahapan eksperimen dimulai dengan persiapan bahan baku. Jumlah bahan baku limbah batang tembakau yang digunakan sebanyak 200 g dengan rasio bahan baku terhadap air sebesar 1:8.

Kemudian dilanjutkan dengan proses HTC pada temperatur 120, 150, dan 180°C dengan dua variasi *residence time*, yakni 3 jam dan 5 jam. Selanjutnya, nilai kalor *hydrochar* yang dihasilkan dianalisis menggunakan metode standar ASTM D5865.

Data yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif deskriptif dengan membandingkan nilai kalor antar perlakuan temperatur dan *residence time*, serta dilakukan interpretasi tren untuk menentukan parameter optimal proses HTC batang tembakau.



Gambar 1. Reaktor dan prosedur HTC

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengaruh variasi temperatur dan residence time terhadap nilai kalor

Penelitian ini mengungkapkan bahwa variasi temperatur dan *residence time* dalam proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC) memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai kalor batang tembakau.

Tabel 1. Perbandingan nilai kalor

Temperatur (°C)	Residence Time (jam)	Nilai Kalor (kal/g)
Raw	-	3149,087
120	3	3329,531
120	5	3375,720
150	3	3441,191
150	5	3528,004
180	3	3841,151
180	5	3915,888

Pada bahan mentah (*raw material*), nilai kalor awal tercatat sebesar 3149,087 kal/g. Namun, setelah mengalami perlakuan HTC pada temperatur 180°C selama 5 jam, nilai kalor meningkat menjadi 3915,888

kal/g (Tabel 1). Peningkatan ini menunjukkan adanya transformasi substansial dalam komposisi kimia biomassa akibat perlakuan termal.

Peningkatan nilai kalor menunjukkan tren yang konsisten seiring dengan peningkatan temperatur dan *residence time* sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 2. Pola kenaikan ini menggambarkan bahwa semakin tinggi energi termal yang diberikan maka semakin besar derajat reaksi dehidrasi, dekarboksilasi, dan aromatisasi yang terjadi pada biomassa.

Secara kimiawi, fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme HTC yang mengubah struktur biomassa.

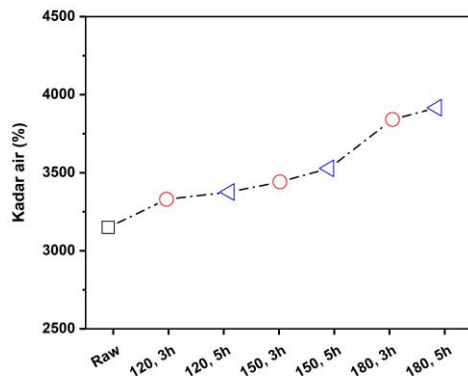
Dehidrasi: Proses ini menghilangkan molekul air dari struktur biomassa, meningkatkan konsentrasi karbon.

Dekarboksilasi: Pelepasan gugus karboksil (-COOH) yang menghasilkan pengurangan kandungan oksigen dan memperkaya rasio C/O.

Aromatisasi: Pembentukan struktur cincin aromatic yang meningkatkan kestabilan termal dan nilai energi produk akhir.

Penelitian ini selaras dengan temuan pada penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa peningkatan temperatur dalam HTC mempercepat reaksi dehidrasi, sehingga rasio karbon terhadap oksigen meningkat secara signifikan dalam produk *hydrochar* [8], [9], [10]. Hal ini secara

langsung berkontribusi terhadap peningkatan nilai kalor, menjadikan produk lebih mirip dengan batu bara kualitas menengah.



Gambar 2. Tren kenaikan nilai kalor *hydrochar* pada berbagai temperatur dan *residence time*

Selain aspek peningkatan nilai kalor, keunggulan lain dari HTC adalah kemampuannya untuk mengolah biomassa basah tanpa membutuhkan tahap pengeringan awal. Hal ini menawarkan efisiensi energi yang jauh lebih baik dibandingkan metode konvensional seperti torrefaksi atau pirolisis kering yang membutuhkan biaya energi tinggi untuk menghilangkan air dari biomassa [11], [12].

Dari sudut pandang lingkungan, optimasi temperatur dan *residence time* dalam HTC juga berimplikasi positif. Dengan menghasilkan *hydrochar* berkualitas tinggi dari limbah batang tembakau, potensi pelepasan gas rumah kaca akibat pembusukan limbah terbuka dapat ditekan. Ini sejalan dengan temuan Zeymer et al. (2017) yang menyatakan bahwa HTC adalah salah satu pendekatan teknologi mitigasi emisi berbasis limbah biomassa yang menjanjikan [13].

3.2. Kondisi operasi optimal htc

Analisis data menunjukkan bahwa kondisi operasi optimal tercapai pada temperatur 180°C dengan *residence time* 5 jam, menghasilkan nilai kalor tertinggi 3915,888 kal/g. Peningkatan ini sebesar 24,3% dibandingkan kondisi awal, mengindikasikan terjadinya proses karbonisasi maksimal. Hasil ini sejalan dengan kajian Thakkar et al. (2019) yang melaporkan bahwa HTC pada temperatur tinggi menghasilkan *hydrochar* dengan densitas energi lebih besar [14].

Secara teknis, kondisi ini juga meningkatkan stabilitas kimia produk, menjadikannya lebih tahan terhadap degradasi selama penyimpanan, sebuah keunggulan penting untuk aplikasi bioenergi skala industri. Pemilihan temperatur dan *residence time* yang tepat dalam HTC batang tembakau tidak hanya meningkatkan nilai kalor, tetapi juga membuka peluang diversifikasi sumber bioenergi lokal.

3.3. Karakteristik nilai kalor produk *hydrochar* batang tembakau

Tren nilai kalor menunjukkan hubungan linier positif terhadap peningkatan temperatur dan *residence time*. Nilai kalor meningkat dari 3329,531 kal/g pada 120°C-3 jam menjadi 3915,888 kal/g pada 180°C-5 jam. Peningkatan ini disebabkan oleh mekanisme reaksi dehidrasi, dekarboksilasi, dan kondensasi aromatik selama proses HTC.

Selain meningkatkan kandungan energi, proses ini juga menghasilkan *hydrochar* yang memiliki struktur karbon aromatik lebih stabil, meningkatkan performa produk untuk aplikasi energi maupun aplikasi lanjutan seperti bahan adsorben atau *soil amendment* [15], [16]. Dengan demikian, kontrol presisi terhadap temperatur dan waktu residence tidak hanya berkontribusi pada optimalisasi energi, tetapi juga terhadap kualitas dan multifungsi produk hasil HTC.

3.4. Spesifikasi batang tembakau sebagai biomassa alternatif

Penelitian ini memperkaya studi biomassa non-konvensional dengan mengeksplorasi batang tembakau sebagai bahan baku HTC. Nilai kalor hasil HTC batang tembakau yang mencapai hampir 4000 kal/g menunjukkan performa kompetitif dibandingkan biomassa konvensional seperti sekam padi atau limbah kayu.

Batang tembakau memiliki kandungan lignoselulosa tinggi yang menjadikannya sangat ideal untuk proses HTC karena lebih mudah dikarbonisasi menjadi produk padat energi tinggi. Dengan demikian, batang tembakau dapat dipertimbangkan sebagai sumber energi terbarukan berbasis limbah pertanian yang potensial sekaligus meningkatkan nilai tambah sektor pertanian.

3.5. Potensi batang tembakau sebagai sumber energi terbarukan

Optimalisasi proses HTC membuka peluang untuk memanfaatkan limbah batang tembakau menjadi bahan bakar padat berkualitas tinggi dan ramah lingkungan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa batang tembakau dapat dikembangkan menjadi alternatif energi terbarukan, sejalan dengan agenda diversifikasi energi nasional dan pengelolaan limbah pertanian berkelanjutan.

Pengembangan teknologi ini membawa banyak keuntungan strategis. Tabel 2 merangkum berbagai alasan utama pentingnya pemanfaatan batang tembakau melalui HTC dalam konteks energi berkelanjutan.

Tabel 2. Keunggulan pemanfaatan batang tembakau sebagai energi terbarukan

No	Alasan	Penjelasan
1	Efisiensi Energi	HTC tidak membutuhkan pengeringan, sehingga lebih hemat energi.
2	Reduksi Emisi	HTC menekan emisi CH ₄ dari pembusukan limbah organik.
3	Diversifikasi Energi	Menambah variasi jenis biomassa energi lokal Indonesia.
4	Ekonomi Pertanian	Meningkatkan nilai tambah limbah tembakau bagi petani.
5	Kualitas Biomassa	Batang tembakau kaya lignoselulosa, ideal untuk konversi HTC.
6	Ketahanan Produk	<i>Hydrochar</i> lebih stabil dan tahan lama selama penyimpanan. Namun perlu penjemuran setelah proses HTC.
7	Aplikasi Ganda	<i>Hydrochar</i> dapat dimanfaatkan juga untuk adsorben atau pengaya tanah.
8	Ekonomi Sirkular	Limbah diubah menjadi produk bernilai tambah tinggi.

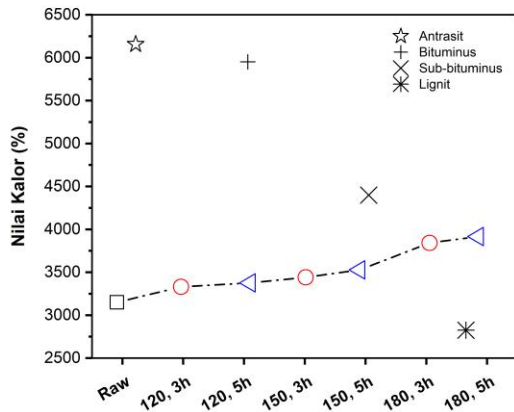
Optimalisasi proses HTC membuka peluang untuk memanfaatkan limbah batang tembakau menjadi bahan bakar padat yang ramah lingkungan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa batang tembakau dapat dikembangkan menjadi alternatif energi terbarukan, sejalan dengan agenda diversifikasi energi nasional dan pengelolaan limbah pertanian berkelanjutan.

Dalam perspektif energi, nilai kalor *hydrochar* yang dihasilkan dari batang tembakau mencapai 3915,888 kal/g, yang menempatkannya dalam rentang nilai kalor batu bara jenis lignit, yakni berkisar antara 3500 hingga 4700 kal/g. Nilai ini menunjukkan bahwa *hydrochar* batang tembakau memiliki potensi yang cukup menjanjikan sebagai bahan bakar alternatif.

Tabel 3 secara rinci menyajikan klasifikasi batu bara berdasarkan kategori nilai kalor yang berbeda-beda, sedangkan Gambar 3 menampilkan perbandingan visual antara nilai kalor *hydrochar* batang tembakau dengan berbagai kelas batu bara, sehingga memudahkan pemahaman mengenai posisi energi *hydrochar* dalam skala kualitas bahan bakar berbasis karbon.

Tabel 3. Klasifikasi Standar Batu Bara berdasarkan Nilai Kalor [17]

Jenis Batu Bara	Nilai Kalor (kal/g)	Karakteristik Umum
Antrasit	6383,61	Karbon sangat tinggi, pembakaran bersih.
Bituminus	6166,00	Digunakan untuk pembangkit listrik dan industri berat.
Sub-bituminus	4516,71	Kandungan karbon sedang, umum untuk pembangkit listrik.
Lignit	2844,64	Kandungan karbon rendah, nilai kalor rendah, kadar air tinggi.



Gambar 3. Perbandingan nilai kalor *hydrochar* batang tembakau dan berbagai jenis batu bara

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa *hydrochar* batang tembakau memiliki nilai kalor direntang batu bara lignit hingga sub-bituminus dan masih dalam kategori yang dapat digunakan untuk kebutuhan energi menengah, seperti pembangkit listrik skala lokal atau industri kecil. Hal ini didukung oleh hasil penelitian bahwa nilai kalor *hydrochar*, terutama pada perlakuan suhu 180°C selama 5 jam, berada mendekati kisaran 4000 kal/g, yang merupakan batas bawah dari kategori batu bara sub-bituminus.

Rentang nilai kalor tersebut menunjukkan bahwa proses HTC secara signifikan meningkatkan densitas energi bahan biomassa. Ini terjadi karena selama proses HTC, senyawa organik yang bersifat hidrofilik dan volatil mengalami dekomposisi dan kondensasi menjadi struktur yang lebih stabil secara termal, serta kaya karbon. Kandungan air dan oksigen dalam biomassa juga berkurang, menghasilkan padatan yang lebih kering, beraroma aromatik, dan mudah terbakar.

Keunggulan ini mempertegas bahwa HTC terhadap batang tembakau dapat menghasilkan produk energi terbarukan dengan performa mendekati batu bara kualitas rendah, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan meningkatkan nilai tambah limbah pertanian.

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa proses *Hydrothermal Carbonization* (HTC)

pada batang tembakau dengan variasi temperatur dan *residence time* dapat secara signifikan meningkatkan nilai kalor produk, pada kondisi optimal tercapai pada temperatur 180°C dan waktu tinggal 5 jam dengan peningkatan nilai kalor mencapai 24,3% dibandingkan nilai awal. Temuan ini mengukuhkan batang tembakau sebagai biomassa alternatif yang potensial untuk dikembangkan menjadi bahan bakar padat ramah lingkungan. Secara praktis, hasil penelitian ini membuka peluang penerapan HTC skala industri untuk pengelolaan limbah pertanian berbasis energi terbarukan di Indonesia. Dari sisi teoretis, riset ini memperkaya literatur tentang optimasi proses HTC biomassa non-konvensional dan mendorong pengembangan teknologi energi berbasis limbah dengan pendekatan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Ke depan, integrasi teknologi HTC pada sektor pertanian dapat menjadi strategi penting dalam mendukung transisi menuju ketahanan energi nasional berbasis sumber daya lokal.

Ucapan terimakasih

Penelitian ini memperoleh dukungan pendanaan melalui Hibah Internal yang disediakan oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Muhammadiyah Jember. Bantuan tersebut sangat penting untuk mendukung setiap tahap penelitian, mulai dari perencanaan hingga penyelesaian. Penulis mengucapkan terima kasih yang mendalam atas dukungan finansial yang diberikan melalui hibah ini.

Referensi

- [1] R. Yanto, "Implementasi Data Mining Prediksi Kebutuhan Tenaga Listrik Di Kota Lubuklinggau," *Techno.COM*, vol. 19, no. 2, pp. 197–206, 2020.
- [2] B. Surya *et al.*, "Economic Evaluation, Use of Renewable Energy, and Sustainable Urban Development Mamminasata Metropolitan, Indonesia," *Sustainability*, vol. 13, no. 3, 2021, doi: 10.3390/su13031165.

- [3] M. F. Demirbas, M. Balat, and H. Balat, "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development," *Energy Convers Manag*, vol. 50, no. 7, pp. 1746 – 1760, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2009.03.013.
- [4] F. Jamil *et al.*, "Valorization of Waste Biomass to Biofuels for Power Production and Transportation in Optimized Way: A Comprehensive Review," *Advanced Energy and Sustainability Research*, vol. 5, no. 10, 2024, doi: 10.1002/aesr.202400104.
- [5] R. P. Ipiates *et al.*, "Swine manure management by hydrothermal carbonization: Comparative study of batch and continuous operation," *Environ Res*, vol. 245, 2024, doi: 10.1016/j.envres.2023.118062.
- [6] C. De Francesco, T. Gasperini, D. Duca, G. Toscano, and A. Ilari, "Hydrothermal Carbonization of Residual Biomass from Agricultural and Agro-Industrial Sector," *Processes*, vol. 12, no. 8, 2024, doi: 10.3390/pr12081673.
- [7] A. Singh *et al.*, "Hydrothermal carbonization: Sustainable pathways for waste-to-energy conversion and biocoal production," *GCB Bioenergy*, vol. 16, no. 6, 2024, doi: 10.1111/gcbb.13150.
- [8] S. Nizamuddin, N. S. J. Kumar, J. N. Sahu, P. B. Ganesan, N. M. Mubarak, and S. A. Mazari, "Synthesis and characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of oil palm shell," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 93, pp. 1916–1921, 2015, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:93503322>
- [9] M. C. Holliday, D. R. Parsons, and S. H. Zein, "Microwave-Assisted Hydrothermal Carbonisation of Waste Biomass: The Effect of Process Conditions on Hydrochar Properties," 2022.
- [10] J. Petrović, M. Simić, M. Mihajlović, M. Koprivica, M. Kojić, and I. Nuić, "Upgrading fuel potentials of waste biomass via hydrothermal carbonization," no. October, pp. 297–306, 2021.
- [11] M. Lucian and L. Fiori, "Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass: Process Design, Modeling, Energy Efficiency and Cost Analysis," 2017. doi: 10.3390/en10020211.
- [12] A. L. Pauline and K. Joseph, "Hydrothermal carbonization of organic wastes to carbonaceous solid fuel – A review of mechanisms and process parameters," *Fuel*, vol. 279, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118472.
- [13] M. Zeymer, K. Meisel, A. Clemens, and M. Klemm, "Technical, Economic, and Environmental Assessment of the Hydrothermal Carbonization of Green Waste," *Chem Eng Technol*, vol. 40, pp. 260–269, 2017, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:100052213>
- [14] A. Thakkar and S. Kumar, "Hydrothermal Carbonization for Producing Carbon Materials," *Sub-and Supercritical Hydrothermal Technology*, 2019, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210236674>
- [15] M. T. Islam *et al.*, "Recent Progress on Emerging Applications of Hydrochar," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 24, 2022, doi: 10.3390/en15249340.
- [16] M. P. Maniscalco, M. Volpe, and A. Messineo, "Hydrothermal carbonization as a valuable tool for energy and environmental applications: A review," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 15, 2020, doi: 10.3390/en13164098.

- [17] ESDM, “Nilai Faktor Emisi (FE) CO2 Nasional dan Nilai Kalor Netto (Net Calorific Value/ NCV) Batu Bara Berdasarkan IPCC,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2019, [Online]. Available:
http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_Sistem_Pembetulan_Terpusat_Strategi_Melestari