



ANALISIS KANDUNGAN SULFUR, NITROGEN, DAN KLORIN DALAM BIOPELLET BERBASIS LIMBAH PADAT KAYU PUTIH DAN GONDORUKEM

(Analysis of Sulfur, Nitrogen, and Chlorine Content in Biopellets Derived from Solid Waste of Cajuput and Gondorukem)

Gysberth Pattiruhu^{1*}, Sofia Mustamu² & Jimmy Fransz²

¹Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura, Ambon, 97233

²Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura, Ambon, 97233

Informasi Artikel:

Submission : 10 Oktober 2024
Accepted : 14 November 2024
Publish : 15 November 2024

*Penulis Korespondensi:

Gysberth Pattiruhu
Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas
Pertanian, Universitas Pattimura, Ambon,
97233, Indonesia.
e-mail:
gysberth.pattiruhu@lecturer.unpatti.ac.id
Telp: +62 821-9766-3163

Makila 18 (2) 2024: 375-384

DOI:
<https://doi.org/10.30598/makila.v18i2.15584>

ABSTRACT

In recent years, a transition towards renewable energy sources has begun to reduce fossil energy usage. One alternative renewable energy source is biopellets, which have gained public interest as an environmentally friendly fuel. Biopellets are a type of renewable energy derived from biomass, which, if it emits too much carbon, can lead to pollution. Carbon emissions are also related to combustion efficiency, as complete combustion can help reduce carbon emissions. This study aims to determine combustion emissions and combustion efficiency of biopellets made from eucalyptus solid waste with the addition of rosin to optimize the use of raw materials as renewable energy. The study employs an experimental laboratory approach with a factorial design to test the impact of sulfur, chlorine, and nitrogen content on the combustion efficiency of biopellets made from eucalyptus waste and rosin. Results indicate that the sulfur and chlorine content remain above the French standard (ITEBE), at 0.31% and 1.12%, respectively, while nitrogen content is below the standard at 0.48%. The resulting combustion efficiency ranges between 9.569% and 9.701%.

KEYWORDS: *biopellets, combustion efficiency, emissions, energy*

INTISARI

Dalam beberapa tahun ini, telah mulai terjadi transisi penggunaan sumber energi terbarukan guna mengurangi penggunaan energi fosil. Salah satu alternatif energi terbarukan adalah biopelet yang telah menarik perhatian masyarakat sebagai bahan bakar yang ramah lingkungan. Biopelet merupakan salah satu energi terbarukan yang berasal dari biomassa yang memiliki emisi karbon yang dapat mengakibatkan pencemaran. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan emisi pembakaran dan efisiensi pembakaran pada biopelet limbah padat kayu putih dengan penambahan gondorukem sehingga mampu mengoptimalkan pemanfaatan bahan baku sebagai energi terbarukan. Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan desain faktorial.

Penelitian dilakukan untuk menguji pengaruh kandungan sulfur, klorin, dan nitrogen terhadap efisiensi pembakaran biopellet yang terbuat dari limbah kayu putih dan gondorukem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan sulfur dan klorin masih diatas standar prancis (ITEBE) yakni sebesar 0,31% dan 1,12%, sementara untuk nitrogen masih dibawah standar yaitu sebesar 0,48%. Efisiensi pembakaran yang dihasilkan berkisar antara 9,569% - 9,701%.

KATA KUNCI: biopellet, efisiensi pembakaran, emisi, energi.

PENDAHULUAN

Energi merupakan salah satu kebutuhan penting bagi kehidupan manusia diantaranya adalah energi fosil (Cainega et al, 2016). Dewasa ini penggunaan akan energi fosil yang merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbahuri semakin meningkat. Semakin tinggi tingkat penduduk di dunia mengakibatkan permintaan akan energi semakin tinggi, sehingga mengakibatkan terjadinya krisis energi (Istiani et al., 2021). Salah satu bahan bakar energi yang mengalami kelangkaan dan sudah dirasakan oleh masyarakat adalah kelangkaan minyak tanah maupun gas elpiji (Monoarfa et al., 2022). Ketergantungan akan penggunaan energi fosil dapat memberikan dampak buruk terhadap lingkungan yang dapat mengakibatkan terjadinya efek gas rumah kaca (GRK), udara yang tidak sehat yang diakibatkan adanya polusi dan terjadinya pemanasan global (Putri et al, 2022). Hal ini mengakibatkan pemerintah harus memikirkan cara untuk dapat mengatasi krisis energi dan juga menemukan solusi untuk permasalahan gas rumah kaca. Dalam beberapa dekade ini, pemerintah telah mengeluarkan beberapa kebijakan salah satunya adalah upaya untuk memproduksi *biofuel* dan biomasa dalam mengatasi terjadinya krisis energi (Luqman et al., 2017).

Biomassa merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan dapat diperoleh dari tanaman maupun limbah yang berasal dari pertanian maupun kehutanan (Mustamu et al., 2018). Biomasa bila dimanfaatkan dengan baik mampu mengurangi aktivitas karbon ke atmosfer, dimana karbon merupakan salah satu zat perusak atmosfer yang dapat mengakibatkan terjadinya perubahan iklim (Hasan et al, 2022). Namun biopellet juga memiliki kelemahan yaitu nilai kalornya rendah yang diakibatkan kandungan air yang cukup tinggi (Purwandari et al., 2022). Untuk mengatasi masalah tersebut maka biomasa perlu dilakukan modifikasi menjadi biopellet.

Biopellet merupakan produk modern biomasa berbentuk silinder dengan panjang 6 sampai 25 mm dengan diameter 12 mm yang dipadatkan melalui tahapan penggilingan, pengeringan dan juga pemadatan, sehingga memiliki kepadatan yang tinggi dan rendah kadar air (Wibowo, 2022). Pemanfaatan limbah hasil hutan untuk dijadikan sebagai bahan baku pembuatan biopellet dikarenakan biopellet dari limbah hasil hutan memiliki daya mekanis dan tingkat kerapatan yang tinggi (Rahman et al, 2022). Dengan adanya pemanfaatan limbah ini tidak hanya mengurangi

penggunaan energi fosil tetapi juga dapat mengurangi volume limbah baik dari pertanian maupun kehutanan (Kalak, 2020).

Salah satu limbah biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai biopellet adalah limbah padat kayu putih. Pemanfaatan limbah padat kayu putih untuk dijadikan biopellet telah banyak dilakukan seperti yang dilakukan oleh Raharjo et al (2023) yang menunjukkan rasio daun dan batang kayu putih (5:1) dapat menghasilkan biobriket yang baik dengan kadar air sebesar 2,21% dan kadar abu sebesar 25,08%. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Zeng et al (2024) menunjukkan bahwa kulit kayu putih setelah dipeletisasi dan thermal dapat meningkatkan kepadatannya sehingga sangat cocok untuk dijadikan bahan bakar alternatif.

Hampir semua bagian dari tanaman kayu putih dapat dimanfaatkan. Salah satu pemanfaatan tanaman kayu putih adalah diolah menjadi minyak melalui proses penyulingan. Limbah padat dari proses penyulingan kayu putih ini dapat berupa ranting yang memiliki kandungan karbon sebanyak 20,08% (Al-Hijri et al., 2021).

Biopellet yang baik untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar harus memiliki permukaan yang halus, mudah dinyalakan, gas dari hasil pembakaran tidak mengandung racun dan mengeluarkan asap yang tebal sehingga akan mengakibatkan polusi, laju pembakaran juga harus merata dan tidak mudah berjamur sehingga bisa disimpan dalam kondisi waktu yang lama (Paga & Renjaa, 2024).

Tantangan terbesar dalam penggunaan biopellet adalah memastikan kemampuan pembakarannya yang ramah lingkungan. Biopellet yang memiliki kandungan sulfur, nitrogen maupun klorin yang tinggi dapat mengakibatkan pencemaran, dimana kandungan sulfur dan nitrogen dengan jumlah yang besar dalam suatu biomassa dapat mengakibatkan percepatan korosi terhadap peralatan pembakaran dan juga menimbulkan polutan udara yang mempengaruhi kualitas pembakaran (Li et al, 2020). Selain itu, klorin dalam biopellet juga dapat menyebabkan korosi pada peralatan pembakaran, mengurangi umur pakai mesin, dan meningkatkan biaya pemeliharaan dan dapat menimbulkan gas beracun seperti HCL saat pembakaran bila kandungan klorin terlalu tinggi (Saleh et al, 2014). Oleh karena itu, penting untuk memahami dan mengendalikan kandungan kimia dalam biopellet untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Berdasarkan uraian maka tujuan daripada penelitian ini adalah menganalisis emisi pembakaran dan efisiensi pembakaran pada biopellet limbah padat kayu putih dengan penambahan gondorukem sehingga mampu mengoptimalkan pemanfaatan bahan baku sebagai energi terbarukan.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan ranting kayu putih berupa ranting gondorukem Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa *disc flaker*, *willey mill*, saringan dengan ukuran 20, 40, 60, dan 80 mesh, timbangan analitik, *pellet mill*, oven, desikator, tanur, cawan porselen, *stopwatch*, kamera, kertas label, kuas, plastik, dan alat tulis.

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan desain faktorial. Penelitian dilakukan untuk menguji pengaruh kandungan sulfur, klorin, dan nitrogen terhadap efisiensi pembakaran biopellet yang terbuat dari limbah kayu putih dan gondorukem. Perlakuan yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada komposisi terbaik dari penelitian sebelumnya (Mustamu et al., 2018), di mana ukuran serbuk 40 *mesh* dengan suhu pengempaan 230°C merupakan perlakuan terbaik. Penelitian ini difokuskan pada uji kualitas pembakaran biopellet dengan variasi kadar sulfur, klorin, dan nitrogen yang telah diidentifikasi dari analisis kimia sebelumnya dan akan diidentifikasi berdasarkan standard Prancis (ITEBE) yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini

Tabel 1. Parameter Mutu Biopellet berdasarkan Standard Prancis (ITEBE), Standar Nasional Indonesia (SNI 8675-2018), Standar Amerika (PFI), Standar Eropa (EN 14961-2)

No	Parameter Uji	SNI	ITEBE	PFI	EN 14961-2
1	Air (%)	10	15		Maks 10
2	Abu (%)	5	6		Maks 3
3	Zat terbang (%)			min 30	-
4	Karbon Terikat (%)			min 60	Min 14
5	Densitas (g/cm ³)	0,6		min 0,64	
6	Densitas Kamba (kg/m ³)				Min 600
7	Nitrogen		maks 0,5		Maks 1,00
8	Sulfur	0,1	maks 0,1		Maks 0,04
9	Klorin		maks 0,07		Maks 0,03

Sumber: Lubis et al (2016); Prabawa & Miyono (2018); SNI 8675-2018

Kandungan Sulfur

Penetapan nilai kandungan sulfur dapat dilakukan dengan cara biopellet dihancurkan sebanyak 0,5 gram sampel uji dan kontrol ditimbang dan dimasukkan kedalam masing-masing tabung pereaksi, ditambahkan 5 ml campuran asam perkhlorat nitrat 1:4 kemudian ditambahkan 1 ml HClO₄ diamkan selama satu malam untuk membentuk ion sulfat. Kemudian panaskan pada suhu awal 100°C hingga uap cokelat dari nitrat akan hilang/ sampai bahan organic teroksidasi, naikan suhunya hingga 200 °C sampai larutan berwarna bening (± 1, 5 ml larutan). Pipet 2 ml larutan deret standard an contoh kedalam botol McCartney. Tambahkan 2 ml larutan buffer asam ketengah-tengah botol sambil digoyang. Tambahkan 1 ml larutan BaCl₂ gelatin sambil digoyang dan tambahkan 5 ml akuades lalu digoyang kembali. Diamkan 30 menit sebelum dibaca, larutan dibaca

dengan Spektrofotometer pada panjang gelombang 400 nm, slit 0.5 mA. Kandungan sulfur dihitung dengan rumus yang dapat dilihat pada persamaan 1 :

$$\text{Kadar S } \left(\frac{g}{100} \right) = \frac{\text{Abs contoh} - \text{Abs blk} \times \frac{1}{\text{slope}} \times V}{\text{gram contoh} \times 1000} \quad (1)$$

Ket: V = volume
S = absorban

Kadar Klorin (Cl) dan Nitrogen (N)

Sebanyak 0.1 g NaCl dilarutkan kedalam labu ukur 100 ml dengan air suling dan impitkan kocok hingga homogen. Kemudian larutan dipipet 3 kali masing-masing 10 ml kedalam kaserol porselin. Tambahkan 1 ml larutan Kalium Khromat 5%. Dititar dengan larutan perak nitrat sambil diaduk dengan pengaduk magnet hingga terjadi perubahan warna merah kecoklatan dari endapan perak khromat.

$$N \text{ AgNO}_3 = \frac{\text{mg NaCl}}{\text{ml AgNO}_3 \times f d \times \text{BM NaCl}} \quad (2)$$

Kemudian konsentrasi AgNO₃ yang didapat digunakan untuk perhitungan kadar klorin. Tempatkan cawan porselin pada oven 105 °C selama 2 jam, dinginkan dalam desikator. Kemudian sebanyak ± 1 g contoh dan kontrol ke dalam masing-masing cawan porselin, diabukan dalam tanur suhu 550 °C selama semalam, lalu masukkan ke dalam labu ukur 100 ml dengan air panas sebanyak 50 ml dan dibiarkan dalam suhu kamar kemudian diimpitkan hingga 100 ml dengan air suling dan kocok hingga homogen. Larutan contoh disaring dengan kertas 7 saring kedalam Erlenmeyer dan hasil saringan dipipet sebanyak 20 ml kedalam kaserol porselin dan tambahkan 1 ml larutan kalium khromat 5% dan masukkan pengaduk magnet. Kemudian dititrasi dengan AgNO₃ 0.1 N hingga larutan terbentuk warna merah kecoklatan.

$$\% \text{ NaCl} = \frac{\text{ml AgNO}_3 \times N \text{ AgNO}_3 \times \text{BM NaCl} (58,5) \times \text{FP}}{\text{mg contoh}} \times 100\% \quad (3)$$

Efisiensi Pembakaran

Efisiensi pembakaran dilakukan untuk mengetahui kualitas suatu bahan bakar biopellet saat diaplikasikan sebagai bahan bakar saat proses pemasakan. Besarnya efisiensi pembakaran dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Pembakaran} = \frac{Q_n}{\text{FCR} \times \text{HVF}} \times 100\% \quad (4)$$

Ket: Q_n = Energi yang dibutuhkan untuk memasak (Kkal/jam)
FCR = Laju konsumsi biopellet (kg/jam)
HVF = Nilai kalor biopellet (Kkal/g)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Emisi Pembakaran Biopellet

Pembakaran biomasa dapat menghasilkan partikulat maupun polutan gas yang diakibatkan oleh pembakaran yang tidak sempurna (Pope et al., 2010). Polutan yang dihasilkan bisa berupa SO₂, NO₂, Cl dan sebagainya. Emisi yang dihasilkan juga tergantung jenis biomassa yang digunakan, sehingga diperlukan pengujian agar dapat mengetahui besaran emisi yang dihasilkan. Tujuan pengujian emisi ini adalah untuk memenuhi standar baku yang telah ditetapkan untuk menjaga keamanan lingkungan.

Pengujian emisi ini dilakukan pada beberapa bahan baku biopellet yaitu biopellet limbah padat kayu putih dan gondorukem, biopellet bagas dan kulit kacang tanah, dan biopellet limbah padat kayu putih. Kandungan sulfur, nitrogen, dan klorin dalam biomassa bervariasi secara signifikan tergantung pada jenis biomassa dan kondisi pembuatan (Hupa et al, 2017). Penelitian menunjukkan bahwa unsur-unsur ini memainkan peran penting dalam sifat termofisika dan karakteristik pembakaran bahan bakar biomassa.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kandungan Sulfur, Klorin dan Nitrogen

Kandungan S, N, Cl (%)	1	2	3	Standard Prancis (ITEBE)	Standard EN 14961-2
Sulfur (%)	0,31	0,12	0,32	0,1	0,04
Nitrogen (%)	0,48	0,51	0,8	0,5	1,00
Klorin (%)	1,12	0,475	2,17	0,07	0,03

Keterangan : 1). Biopellet kayu putih dan gondorukem; 2) Biopellet bagas dan kulit kacang tanah; 3) biopellet kayu putih

Menurut Hupa et al (2016) pada umumnya kandungan sulfur lebih rendah dibandingkan dengan kadar nitrogen pada suatu biomasa. Sulfur dalam biopellet biasanya dalam bentuk sulfur organik maupun sulfat anorganik. Produk akhir dari sulfur dalam bahan bakar membentuk emisi SO₂ akhir, namun ada juga yang telah terbentuk namun ditangkap kembali oleh konstituen abu dalam gas buang. Kadar emisi SO₂ yang dihasilkan dari ketiga jenis biopellet tidak memenuhi standard Prancis yakni sebesar 0,1 ataupun standar Eropa yaitu 0,04. Kadar emisi SO₂ tertinggi terdapat pada biopellet limbah kayu putih tanpa penambahan maupun penambahan gondorukem yakni sebesar 0,31 dan 0,32%. Hal ini dapat disebabkan oleh karena tingginya kandungan sulfur pada bahan baku yaitu limbah padat kayu putih (Setiani et al., 2019). Dampak dari sisa pembakaran yang mengandung SO₂ dalam jumlah yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya iritasi pernafasan (Vakkilainen, 2017).

Pada saat pembakaran biopellet, Sebagian besar nitrogen yang terkandung dalam suatu biopellet akan dilepaskan Bersama dengan zat-zat volatil dan sisanya akan tetap terikat pada biopellet dan dapat dilepaskan saat terjadinya oksidasi (Hupa et al, 2017). Kandungan emisi N yang dihasilkan dari jenis biopellet yang terbuat dari kayu putih tanpa penambahan gondorukem memiliki kandungan nitrogen sebesar 0,8% dan tidak memenuhi standar Prancis dengan ambang

batas maks 0,5%, sedangkan biopellet kayu putih dengan penambahan gondorukem dan biopellet bagas dan kulit kacang tanah memiliki kandungan nitrogen yang sesuai dengan standar prancis (ITEBE). Namun berdasarkan standar Eropa (EN 14961-2) ketiga jenis biopellet telah sesuai dengan standar dimana ambang batas Nitrogen maksimum 1% dan ketiga jenis biopellet nitrogennya dibawah 1%. Nitrogen yang terlepas bebas ke udara dan bereaksi dengan oksigen maka dapat menjadi senyawa nitrogen dioksida (NO₂) yang membahayakan. Semakin tinggi kadar emisi N yang terlepas bebas maka akan semakin tinggi juga NO₂ (Setiani et al., 2019).

Sementara itu, kadar klorin yang melebihi standar meningkatkan risiko korosi pada peralatan pembakaran. Klorin dapat bereaksi dengan uap air dan menghasilkan asam klorida (HCl), yang bersifat korosif dan dapat memperpendek umur peralatan serta meningkatkan biaya perawatan (Hruska et al, 2022). Emisi klorin juga berpotensi mencemari atmosfer dan menimbulkan efek negatif pada kualitas udara.

Dalam mengatasi permasalahan ini telah dilakukan beberapa penelitian untuk mengurangi emisi karbon didalam suatu biomasa dengan melakukan torefikasi. Torefikasi adalah suatu metodeu yang dilakukan untuk menghasilkan bahan bakar dengan kepadatan energi yang meningkat dan kemampuan penggilingan yang lebih baik, sehingga mengurangi biaya transportasi, penggilingan dan penyimpan (Saleh et al, 2014).

Efisiensi Pembakaran Biopellet

Analisis karakteristik pembakaran berfungsi untuk mengetahui karakteristik dan kualitas bahan bakar biopellet saat digunakan sebagai bahan bakar. Efisiensi ini dihitung dengan membandingkan energi yang dihasilkan dari pembakaran dengan energi yang terkandung dalam bahan bakar yang digunakan. Ada beberapa metode yang dapat digunakan, seperti pengukuran suhu gas buang, analisis komposisi gas, dan penggunaan alat ukur seperti calorimeter. Analisis karakteristik pembakaran biopellet dilakukan untuk biopellet terbaik yang memenuhi standard SNI 8021-2014 yaitu biopellet dengan ukuran partikel 40 mesh pada suhu pengempaan 230°C. Pengujian karakteristik pembakaran biopellet menggunakan kompor biopellet dengan biopellet sebanyak 550 gram, air sebanyak 3000 ml atau 3 L. menggunakan metode *Water boiling test*. Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian karakteristik pembakaran (Efisiensi pembakaran).

Tabel 2. Efisiensi Pembakaran Biopellet

Sampel	Waktu Pendidihan 1 L air (jam)	Massa yang terpakai (kg)	Laju Konsumsi (Kg/jam)	Energi yang untuk memasak (Kkal/jam)	Efisiensi pembakaram
1	0,15	0,152	1,01	500	9,701
2	0,12	0,152	1,30	634,29	9,569
3	0,08	0,152	1,82	888	9,569

Saat bahan bakar dibakar, pembakaran yang efisien akan memaksimalkan produksi energi sekaligus meminimalkan emisi karbon. Sebaliknya, pembakaran yang kurang efisien cenderung menghasilkan lebih banyak emisi karbon karena energi dari bahan bakar tidak dimanfaatkan secara optimal, sehingga terbentuk produk sampingan yang merugikan seperti karbon monoksida dan partikel berbahaya. Dengan meningkatkan efisiensi pembakaran, kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan energi dapat dikurangi, yang secara langsung mengurangi emisi karbon dan dampak terhadap perubahan iklim.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa emisi pembakaran biopellet limbah padat kayu putih dengan penambahan gondorukem masih terlalu tinggi untuk parameter sulfur dan klorin yaitu sebesar 0,31% dan 1,12% dan belum sesuai dengan standar ITEBE, sedangkan untuk nitrogen sudah termasuk standar Prancis (ITEBE) yaitu sebesar 0,48%. Dalam menangani emisi pembakaran yang berlebihan dapat dilakukan dengan menerapkan metode torefikasi maupun pirolisis. Efisiensi pembakaran biopellet yang dihasilkan pada penelitian ini adalah sebesar 9,569 - 9,701%. Efisiensi pembakaran yang sempurna dapat mengurangi emisi karbon dan memaksimalkan energi.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Hijri, M. F., Sunu, W., Dwandaru, B., Sc, M., & Ph, D. (2021). Sintesis Carbon Nanodots Berbahan Dasar Limbah Padat Tanaman Kayu Putih Sebagai Antibakteri *Staphylococcus aureus*. *Jurnal Ilmu Fisika Dan Terapannya*, 8(2), 36-42.
- Anwar, M. (2022). Green Economy sebagai Strategi dalam Menangani Masalah Ekonomi dan Multilateral. *Jurnal Pajak dan Keuangan Negara*, 4(15): 344-356
- Arief, K. (2017). Karakteristik Fisikokimia Pellet Kayu Sebagai Sumber Energi Alternatif. Program Keahlian Analisis Kimia. Institut Pertanian Bogor.
- Cainenga, Z., Qun, Z., Guosheng, Z., Bob, X. 2016. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. *Natural Gas Industry B*. 3(1):111. doi:10.1016/ j.ngib.2016.02.001.
- Hassan, S. T., Batoool, B., Sadiq, M., & Zhu, B. (2022). How do Green Energy Investment, Economic Policy Uncertainty, and Natural Resources Affect Greenhouse Gas Emissions? A Markov-Switching Equilibrium Approach. *Journal of Environmental Impact Assessment Review*, 97(Article 106887).
- Hruska, J., Mlnarik, J., Cizner, J. 2022. High-Temperature Corrosion of Nickel-Based Coatings for Biomass Boilers in Chlorine-Containing Atmosphere. *Coatings* 2022, 12, 116. <https://doi.org/10.3390/coatings12020116>
- Hupa, M., Karlström, O., Vainio, E. (2017). Biomass combustion technology development - It is all about chemical details. 36(1):113-134. doi: 10.1016/J.PROCI.2016.06.152
- Istiani, W., Sribudiani, E., & Somadona, S. (2021). Biopellet Dari Limbah Cangkang Kemiri (Aleurites Moluccana) Dengan Campuran Biomassa Limbah Batang Sagu (Metroxylon Sagu) Dan Serbuk Gergaji Sebagai Sumber Energi Alternatif. *Wahana Forestra: Jurnal Kehutanan*, 16(2), 170-180. <https://doi.org/10.31849/forestra.v16i2.7056>.

- Kalak, T. 2020. Potential use of industrial biomass waste as a sustainable energy source in the future," *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 1783, 2023
- Li, L., Liu, G., Li, Y., Zhu, Z., Xu, H., Chen, J., Ren, X. 2020. Release of Sulfur and Nitrogen during Co-pyrolysis of Coal and Biomass under Inert Atmosphere. *ACS Omega*, 5(46): 29623-30347. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04372>
- Lubis, A. S. (2015). *Pengaruh Torefikasi dan Komposisi Bahan Terhadap Kualitas Biopellet Bagas dan Kulit Kacang Tanah*. 1-62.
- Lubis, A. S., Romli, M., Yani, M., Pari, G. (2016). Mutu Biopellet dari Bagas, Kulit Kacang Tanah dan POD Kayu. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 26(1): 77-86
- Luqman, Y., Sumardjo, S., Sarwoprasodjo, S., & Tambunan, A. H. (2017). Solusi Menuju Konvergensi Arah Komunikasi Kebijakan Publik dalam Rangka Antisipasi Krisis Energi. *Jurnal Ilmu Komunikasi*, 15(2), 134. <https://doi.org/10.31315/jik.v15i2.2161>
- Monoarfa, S., Djafar, R., Akuba, S., & Haluti, S. (2022). Rancang Bangun Mesin Pencetak Biopellet dari Sekam Padi. *Jurnal Teknologi Pertanian Gorontalo (JTPG)*, 7(2), 51-56. <https://doi.org/10.30869/jtpg.v7i2.959>
- Mustamu, S., Hermawan, D., & Pari, G. (2018). Karakteristik Biopellet dari Limbah Padat Kayu Putih dan Gondorukem (Characteristic of Biopellet Made of Solid Waste of Cajuput and Pine Resin). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 36(3), 191-204.
- Paga, B. O., & Renjaa, J. C. (2024). *Pengaruh Variasi Ukuran Partikel Terhadap Laju Pembakaran dan Kerapatan Massa pada Biopellet Biji Buah Merah Effect of Particle Size Variations on Burning Rate and Mass Density in Red Fruit Seed Biopellets*. 7(1), 1-8.
- Pope, D. P., Mishra, V., Thompson, L., Siddiqui, A. R., Rehfuess, E. A., Weber, M., & Bruce, N. G. (2010). Risk of low birth weight and stillbirth associated with indoor air pollution from solid fuel use in developing countries. *Epidemiologic Reviews*, 32(1), 70-81. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxq005>
- Pramudiyanto, A. S., Suedy, S. W. A. (2020). Energi Bersih dan Ramah Lingkungan dari Biomassa Untuk Mengurangi Gas Rumah Kaca dan Perubahan Iklim yang Ekstrem. *Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 1(3): 86-99. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9990>
- Pribawa, I. D. G. P., & Miyono. (2018). Mutu Biopellet dari Campuran Cangkang Buah Karet dan Bambu Ater (*Gigantochloa atter*). *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 9(2): 99-110. <https://doi.org/10.24111/jrihh.v9i2.3524>
- Purwandari, V., Harahap, M., Zai, L., & Arya Mubarakh, M. (2022). Pengolahan Limbah Kulit Kakao Dan Kemiri Pada Pembuatan Biopellet Sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Kimia Saintek Dan Pendidikan*, 6(2), 72-78. <https://doi.org/10.51544/kimia.v6i2.3492>
- Putri, A. R., Gunarto, T., Emalia, Z., & Murwiati, A. (2022). Pengaruh Pertumbuhan Ekonomi, Pertumbuhan Penduduk, dan Konsumsi Energi terhadap Emisi CO2 di Indonesia. *Jurnal Multidisiplin Ilmu*, 1(6), 1070-1080
- Raharjo, S. H., Etnanta, F. N., Sugondo, E. (2023). Pembuatan Biobriket dari Limbah Daun dan Batang Kayu Putih (*Malaleuca leucadendron*) Guna Memanfaatkan Limbah Hasil Pertanian di Kecamatan Jeruklegi Kabupaten Cilacap. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(1):67-75. doi: 10.35970/jppl.v5i1.1762
- Rahman, M. M., Haque, M. A., Akter, N., Jamal, M. S., Hossain, M. 2022. Production of Biomass Pellets from Sawdust to Enhance Fuel Efficiency. doi: 10.21203/rs.3.rs-1903314/v1
- Saleh., S., Flensburg, J. P., Shoulaifar, T. K., Sárossy, Z., Hansen, B. B., Egsgaard, H., DeMartini, N., Jensen, P. A., Glarborg, P., Kim, D. J. (2014). Release of Chlorine and Sulfur during Biomass Torrefaction and Pyrolysis. *Energy & Fuels*, 28(6):3738-3746. doi: 10.1021/EF4021262
- Setiani, V., Rohmadhani, M., Setiawan, A., & Maulidya, R. D. (2019). Potensi Emisi dari Pembakaran

- Biobriket Ampas Tebu dan Tempurung Kelapa. *Seminar MASTER*, 115–118.
<http://journal.ppns.ac.id/index.php/SeminarMASTER>
- Vakkilainen, E. K. (2017). Solid Biofuels and Combustion. In *Steam Generation from Biomass*.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804389-9.00002-2>
- Wibowo, S. (2022). Pengaruh Penambahan Tepung Tapioka Pada Karakteristik Pelet Kayu dari Limbah Cabang Kayu Jati Perhutani Plus (JPP). *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 16(1), 50–63.
<https://doi.org/10.22146/jik.v16i1.1807>
- Zheng, Y., Ma, D., Liu, Z., Hong, T., Zhang, B., Zhang, Q., Zhou, Z., Wei, J., QZhong, Q., Liu, G., Hu, H., Fu, L., Feng, Q. 2024. Solid Biofuel Preparation from Eucalyptus Bark by Hydrothermal Treatment and Pelletization: Fuel Properties, Combustion Behavior and Ash Slagging Tendency. *Journal of The Energy Institute*, doi: 10.1016/j.joei.2024.101636.