

Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin

Volume 3, Nomor 7, Agustus 2025, P. 168-175

E-ISSN: 2986-6340

Licensed by CC BY-SA 4.0

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16990861>

Model Pengembangan Pelet Biomassa dari Sampah Daun dan Ranting untuk Mendukung Transisi Energi dan Pengelolaan Sampah Berkelanjutan di Cilacap

Nur Indah Wardani¹, Dewi Hestyani², Andika Prastya³, Dian Prabowo⁴, Ahmad Restian⁵, Adi Nugroho⁶

¹Prodi Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap

^{2,3}PT.SBI Cilacap

^{4,5,6}Prodi Teknik Mesin Politeknik Negeri Cilacap

Email: nurindahwardani@pnc.ac.id¹, dewi.hestyani@sig.id², andika.prastya@sig.id³

Abstrak

Indonesia menghadapi tantangan ganda berupa ketergantungan tinggi pada batubara dan peningkatan volume sampah organik daun dan ranting. Studi ini mengkaji pengembangan pelet biomassa dari sampah daun dan ranting sebagai energi baru terbarukan (EBT) yang diinisiasi PT Solusi Bangun Indonesia (SBI) Cilacap bersama Politeknik Negeri Cilacap. Analisis mencakup konsep teknis, dampak lingkungan melalui pendekatan siklus hidup, serta potensi dan tantangan implementasi. Hasil menunjukkan penggunaan pelet biomassa dapat menurunkan emisi gas rumah kaca neto dan gas metana dari pembakaran daun dan ranting oleh masyarakat, serta mendukung model ekonomi sirkular. Tantangan utama meliputi konsumsi energi produksi dan kontrol emisi partikulat. Konsep ini layak secara teknis dan ekologis dengan optimalisasi dan dukungan kebijakan sebagai syarat komersialisasi.

Kata Kunci: sampah daun dan ranting, pelet biomassa, ekonomi sirkular, energi terbarukan

Abstract

Indonesia faces dual challenges in the form of high dependence on coal and increased volumes of leaf and ranting organic waste. This study studied the development of biomass pellets from leaf litter and ranting as renewable energy (EBT) initiated by PT Building Solutions Indonesia (SBI) Cilacap together with Cilacap State Polytechnic. Analysis includes technical concepts, environmental impacts through a life cycle approach, as well as implementation potentials and challenges. Results show the use of biomass pellets can decrease net greenhouse gas and methane gas emissions from leaf burning and ranting by the community, as well as supporting the circular economy model. The main challenges include production energy consumption and particulate emission control. The concept is technically and ecologically feasible with optimization and policy support as a prerequisite for commercialization.

Keywords: leaf litter and ranting, biomass pellets, circular economy, renewable energy

Article Info

Received date: 30 July 2025

Revised date: 17 August 2025

Accepted date: 25 August 2025

PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi tantangan besar dalam menjamin ketahanan energi yang berkelanjutan sekaligus mengatasi permasalahan lingkungan yang kompleks. Salah satu isu krusial adalah ketergantungan tinggi terhadap batubara sebagai sumber energi utama, yang pada tahun 2023 mendominasi sekitar 40% bauran energi primer nasional serta lebih dari 50% kapasitas pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) (1, 2). Ketergantungan ini menyebabkan emisi gas rumah kaca (GRK) dalam jumlah besar, khususnya karbon dioksida (CO₂), serta polusi udara lokal berupa sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), dan partikulat halus (PM_{2.5}), yang berdampak buruk pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat (3, 4). Selain itu, kegiatan penambangan batubara secara terbuka menyebabkan degradasi lahan dan kehilangan ekosistem penting (5).

Di Kabupaten Cilacap, sampah organik berupa daun dan ranting merupakan kontributor utama dalam komposisi timbunan sampah dengan volume yang sangat besar setiap tahunnya (6). Pengelolaan sampah daun dan ranting saat ini masih kurang optimal, di mana sebagian besar dikelola secara tradisional melalui pembuangan langsung atau pembakaran terbuka di lingkungan pemukiman. Praktik pembakaran terbuka ini memicu pelepasan emisi polutan berbahaya seperti partikulat halus

(PM2.5), karbon monoksida (CO), dan senyawa organik volatil (VOCs), yang berdampak merugikan terhadap kesehatan pernapasan masyarakat serta menurunkan kualitas udara ambien (7).

Namun, dari sisi potensi, limbah daun dan ranting ini merupakan material lignoselulosa yang kaya akan molekul organik multikarbon, sehingga menyimpan sumber energi signifikan sebagai bahan bakar biomassa (8). Komponen utama lignoselulosa meliputi selulosa ($C_6H_{10}O_5$)_n (30-50%), hemiselulosa ($C_5H_8O_4$)_m (15-35%), dan lignin ($C_9H_{10}O_3(OCH_3)$) (10-20%) (9). Kandungan lignoselulosa dari sampah daun dan ranting ini adalah sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk substitusi bahan bakar fosil. Pemanfaatan biomassa dari limbah daun dan ranting sebagai pelet biomassa muncul sebagai solusi strategis yang mampu mengurangi ketergantungan terhadap batubara sekaligus mengoptimalkan pengelolaan sampah organik secara berkelanjutan. Selain itu, konsep ini mengadopsi paradigma ekonomi sirkular dengan mengubah limbah menjadi produk bernilai energi yang dapat digunakan untuk co-firing di PLTU dan industri semen, sehingga mendukung penurunan emisi karbon sekaligus meringankan beban pengelolaan sampah daun dan ranting (10, 11).

Penelitian ini bertujuan menjawab tiga pertanyaan utama terkait pengembangan pelet biomassa dari sampah daun dan ranting di Cilacap. Pertama, mengkaji konsep teknis dan alur produksi pelet yang memenuhi standar kualitas sebagai substitusi batubara. Kedua, melakukan evaluasi lingkungan secara komprehensif menggunakan pendekatan siklus hidup dengan fokus pada emisi gas rumah kaca, polutan udara, dan manajemen limbah dibandingkan batubara. Ketiga, mengidentifikasi faktor pendukung dan penghambat implementasi skala komersial di konteks lokal. Kajian ini menyajikan kontribusi baru melalui integrasi aspek teknis produksi pelet dari limbah dengan karakteristik kadar abu dan kelembapan yang beragam, penerapan analisis siklus hidup secara sistematis, serta studi kasus kolaborasi antara industri semen, institusi vokasi, dan masyarakat. Pendekatan multidisipliner ini menggabungkan dimensi energi, lingkungan, sosial, dan ekonomi dalam kerangka ekonomi sirkular, sehingga menghasilkan model transisi energi terbarukan dan pengelolaan sampah perkotaan inovatif yang berpotensi direplikasi secara luas di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitis dengan metode kualitatif dan strategi studi kasus. Pendekatan deskriptif-analitis dipilih untuk memberikan gambaran komprehensif tentang proses pengembangan pelet biomassa dari sampah daun dan ranting di Kabupaten Cilacap serta untuk menganalisis dampak lingkungan dan faktor-faktor pendukung maupun penghambat implementasinya. Pendekatan kualitatif digunakan untuk memperoleh pemahaman mendalam terkait aspek teknis, sosial, dan lingkungan dalam konteks lokal. Metode studi kasus diterapkan sebagai strategi utama dengan fokus pada inisiatif kolaborasi antara PT Solusi Bangun Indonesia (SBI) Cilacap dan Politeknik Negeri Cilacap sebagai unit analisis.

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama empat bulan, dimulai dari Mei hingga Agustus 2025. Lokasi penelitian berpusat di Kabupaten Cilacap, khususnya di Desa Tritih Lor, Kecamatan Jeruklegi, yang merupakan lokasi pelaksanaan *pilot project* pengembangan pelet biomassa.

Sumber Data dan Teknik Pengumpulan

Penelitian ini merupakan penelitian *desk research* yang mengandalkan data sekunder, berupa laporan teknis, dokumen kebijakan, artikel jurnal ilmiah, serta data hasil laboratorium dari SBI Cilacap. Untuk memperkaya data dan memvalidasi temuan, potensi pengumpulan data primer melalui wawancara semi-terstruktur dengan pihak industri, akademisi, dan perwakilan masyarakat direncanakan sebagai kajian lanjutan. Selain itu, observasi lapangan juga direkomendasikan untuk penelitian eksperimental berikutnya.

Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

- Analisis Konsep:** Menguraikan dan merekonstruksi alur produksi pelet biomassa mulai dari pengumpulan bahan baku, pencacahan, pengeringan, proses peletisasi, hingga produk akhir. Analisis ini juga mengevaluasi parameter teknis berdasarkan standar kualitas pelet biomassa.
- Analisis Dampak Lingkungan:** Melakukan analisis komparatif mengenai dampak lingkungan siklus hidup pelet biomassa dibandingkan dengan batubara, dengan fokus pada emisi gas rumah kaca (GRK), polutan udara, dan limbah residu pembakaran.

- c. Analisis Potensi dan Tantangan Implementasi: Menilai faktor-faktor internal dan eksternal melalui kerangka SWOT untuk menilai kelayakan serta potensi skalabilitas dari konsep yang dikaji.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengembangan pelet biomassa dari sampah daun dan ranting di Kabupaten Cilacap

Penelitian ini menelaah sebuah inisiatif perintis yang lahir dari sinergi sektor industri dan akademisi di Kabupaten Cilacap, dengan tujuan mengatasi tantangan kebutuhan energi industri sekaligus permasalahan pengelolaan sampah organik. Inisiatif ini berfokus pada pengembangan bahan bakar alternatif berbasis biomassa lokal yang berasal dari sampah daun dan ranting. Inisiatif dikembangkan oleh dua pihak utama yang saling melengkapi peran dan kontribusinya, yaitu:

a. PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Pabrik Cilacap (SBI Cilacap)

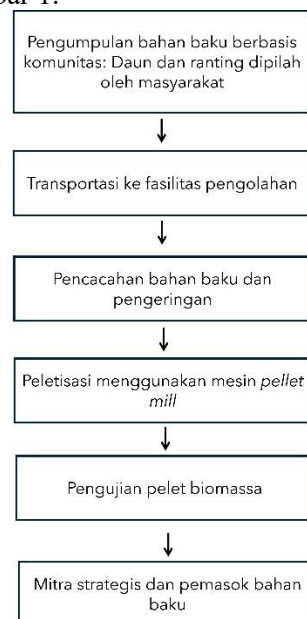
Sebagai bagian dari Semen Indonesia Group (SIG), SBI Cilacap merupakan salah satu produsen semen utama nasional yang memiliki kebutuhan energi termal tinggi untuk operasional tanur putar (rotary kiln). Komitmen perusahaan terhadap dekarbonisasi dan pembangunan berkelanjutan mendorong pencarian bahan bakar alternatif untuk mensubstitusi batubara. Dalam inisiatif ini, SBI Cilacap bertindak sebagai inisiator, calon pengguna akhir (*off-taker*), serta penyedia platform implementasi industri.

b. Politeknik Negeri Cilacap (PNC)

Sebagai institusi vokasi dengan fokus riset terapan, PNC mendukung pengembangan teknis melalui penelitian dan pengembangan. Bidang keahlian teknik mesin dan energi memungkinkan PNC menjadi mitra R&D yang bertanggung jawab atas desain teknis, pengujian proses produksi pelet, analisis karakteristik bahan baku dan produk, serta evaluasi kelayakan teknis konsep.

c. Proses Produksi yang Diimplementasikan

Berdasarkan hasil uji coba (trial) yang menghasilkan empat ton pelet biomassa, alur proses produksi yang diterapkan dapat dilihat di gambar 1.



Gambar 1. Alur proses pengembangan biomassa

1) Pengumpulan Bahan Baku Berbasis Komunitas

Sampah daun kering dan ranting dikumpulkan secara selektif oleh masyarakat sekitar melalui mekanisme pemilahan di sumber, guna menjaga kebersihan bahan baku dari kontaminan anorganik seperti plastik.

2) Transportasi ke Fasilitas Pengolahan

Bahan baku yang terkumpul kemudian diangkut ke fasilitas pengolahan skala percontohan yang berlokasi di Kelurahan Kebonmanis, Cilacap.

3) Pra-Perlakuan dan Produksi Pelet

Di fasilitas tersebut dilakukan pencacahan bahan baku untuk memperoleh ukuran seragam, pengeringan dengan metode penjemuran agar kadar air turun ke level optimal, serta pemadatan

menggunakan mesin pelet (pellet mill) untuk menghasilkan produk pelet biomassa yang seragam dan padat.

4) Pengujian Produk

Sebanyak 4 ton pelet yang dihasilkan selanjutnya diuji di laboratorium SBI Cilacap untuk mengevaluasi karakteristik fisik, kimia, dan performa pembakaran.

d. Peran Masyarakat dalam Rantai Pasok

Model inisiatif ini mengintegrasikan masyarakat sebagai mitra strategis di tahap paling hulu rantai pasok, bukan sekadar sebagai objek. Peran masyarakat meliputi:

- Pemasok Bahan Baku
Warga aktif mengumpulkan dan memilah sampah daun dan ranting dari lingkungan sekitar, mengubah limbah organik yang tidak bernilai menjadi komoditas untuk kegiatan industri.
- Agen Kebersihan Lingkungan
Partisipasi masyarakat secara langsung membantu mengurangi volume sampah yang dibuang ke Tempat Penampungan Sementara (TPS) atau Tempat Pembuangan Akhir (TPA), serta mencegah pembakaran sampah liar.
- Potensi Manfaat Ekonomi
Meski masih pada tahap percontohan, model ini membuka peluang pengembangan skema insentif—mirip konsep bank sampah—yang memberikan kompensasi finansial maupun non-finansial bagi warga yang menyetorkan sampah organik, sehingga mendorong keberlanjutan partisipasi sosial-ekonomi.

Dengan demikian, inisiatif pengembangan pelet biomassa dari sampah daun dan ranting di Kabupaten Cilacap bukan hanya merupakan proyek teknis, tetapi juga merupakan model sosio-teknis yang mengintegrasikan tujuan industri, keahlian akademis, dan partisipasi komunitas dalam kerangka ekonomi sirkular yang berkelanjutan.

Analisis proses dan teknologi

Analisis ini membahas tahapan teknis utama dalam proses produksi pelet biomassa yang berasal dari sampah daun dan ranting, dengan mengacu pada prinsip rekayasa densifikasi biomassa dan disesuaikan dengan kondisi bahan baku serta skala implementasi di Cilacap.

a. Tahap Pengumpulan: Model Berbasis Komunitas

Pengumpulan bahan baku dilakukan dengan melibatkan partisipasi masyarakat secara aktif untuk memilah dan mengumpulkan sampah daun dan ranting. Pendekatan ini menawarkan efisiensi dari sisi biaya modal (*capital cost*) karena tidak memerlukan investasi besar pada armada pengangkut dan SDM khusus. Keberhasilan metode ini sangat bergantung pada keberlangsungan sistem insentif dan sosialisasi yang efektif guna memastikan kontinuitas pasokan dan kualitas bahan baku. Kontaminasi oleh sampah anorganik (plastik, kerikil) masih menjadi tantangan utama, sehingga perlu dilakukan mekanisme quality control sederhana pada titik pengumpulan komunal sebelum bahan baku diangkut ke fasilitas utama (12). Keunggulan utama metode ini adalah pengadaan bahan baku yang telah terpilah di sumber, sehingga mengurangi beban kerja dan kebutuhan pengolahan pada tahap selanjutnya.

b. Tahap Pencacahan (Size Reduction)

Setelah pengumpulan, bahan baku mengalami pencacahan menggunakan mesin berupa *hammer mill* atau *chipper/shredder*. *Hammer mill* efektif untuk material yang mudah rapuh seperti daun kering, sedangkan *chipper* lebih sesuai untuk ranting yang lebih keras dan fibrosa. Pencacahan bertujuan menghasilkan ukuran partikel homogen dengan diameter umumnya <5 mm untuk memaksimalkan luas permukaan, mempercepat pengeringan, dan memastikan bahan masuk serta terpadatkan optimal di dalam cetakan mesin pelet (13). Tahap pencacahan ini adalah salah satu fase dengan konsumsi energi listrik yang signifikan dalam rantai produksi.

c. Tahap Pengeringan (Drying)

Pengeringan merupakan tahap kritis dan sering menjadi bottleneck dalam produksi pelet. Bahan baku daun dan ranting yang dikumpulkan memiliki kadar air awal yang bervariasi, dapat mencapai 20–40% bergantung kondisi cuaca dan penyimpanan. Penurunan kadar air secara signifikan dibutuhkan agar kadar air akhir mencapai <15% (ideal 10–12%) untuk memastikan efisiensi dan kualitas pelet saat peletisasi dan pembakaran. Metode pengeringan pada skala percontohan menggunakan penjemuran secara alami (sun drying); namun, metode ini tidak konsisten dan sangat tergantung cuaca. Oleh karena itu, untuk skala industri diperlukan pengering mekanis menggunakan rotary dryer yang lebih andal dan

dapat mengontrol tingkat kelembaban akhir secara presisi. Tahap pengeringan merupakan konsumsi energi paling besar dalam proses produksi pelet, sehingga efisiensi energi pada tahap ini sangat menentukan biaya produksi (14, 15).

d. Tahap Peletisasi (*Pelletizing*)

Pada tahap ini, material kering dimasukkan ke mesin pellet mill yang terdiri dari rol bertekanan tinggi dan cetakan baja (*die*). Proses peletisasi mencakup dua fenomena utama, yakni kompaksi partikel dengan tekanan ekstrem sehingga menghilangkan rongga udara dan meningkatkan densitas, serta panas akibat gesekan yang melunakkan lignin, a polimer alami dalam biomassa—sebagai perekat alami sekaligus pembentuk pelet yang padat dan kuat pada saat mendingin (16-19). Keberhasilan peletisasi dipengaruhi oleh kesesuaian antara tekanan, suhu, dan kecepatan rotasi mesin dengan karakteristik bahan baku seperti kadar air dan komposisi kimia (terutama kandungan lignin).

e. Estimasi Karakteristik Produk Pelet

Berdasarkan uji coba (*trial*) dan analisis laboratorium di laboratorium SBI Cilacap, karakteristik pelet biomassa yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

- Nilai Kalor (*Calorific Value*): 2.803 Kcal/Kg atau 12 MJ/kg. Nilai ini lebih rendah daripada pelet kayu premium (17–19 MJ/kg) karena perbedaan komposisi kimia daun dan kadar abu yang lebih tinggi. Meskipun demikian, nilai kalor ini cukup signifikan sebagai bahan bakar substitusi atau co-firing dengan batubara kualitas rendah hingga menengah (20).
- Kadar Abu (*Ash Content*): Berkisar antara 23.83 %. Kadar abu tinggi berpotensi menimbulkan masalah operasional seperti slagging dan fouling pada tanur semen dan memerlukan penanganan khusus.
- Densitas Curah (*Bulk Density*): Setelah peletisasi, produk memiliki densitas curah 370 kg/m³, jauh lebih tinggi dibandingkan biomassa mentah (<100 kg/m³). Hal ini meningkatkan efisiensi logistik, penyimpanan, dan penanganan (21).
- Kadar Air (*Moisture Content*): 2.64 % memastikan pembakaran efisien dan minim emisi (22).
- Daya Tahan Mekanis (*Durability*): 95% untuk memastikan pelet tidak mudah hancur saat transportasi dan penanganan (Sebayang et al., 2019).



Analisis Dampak Lingkungan Siklus Hidup

Analisis lingkungan dilakukan secara bertahap dari hulu ke hilir untuk mengidentifikasi dampak positif maupun potensi risiko dari penggunaan pelet biomassa sampah daun dan ranting.

- a. Tahap Hulu (*Upstream*): Pengumpulan Sampah dan Manfaat Lingkungan
Model pengumpulan berbasis komunitas mengkonversi sampah yang awalnya limbah menjadi sumber daya, sehingga menghasilkan manfaat lingkungan yang signifikan.
- b. Pencegahan Emisi Metana (CH₄) dari TPA: Sampah daun dan ranting yang masuk ke TPA mengalami dekomposisi anaerobik menghasilkan gas metana yang berpotensi pemanasan global 25 kali lebih kuat dari CO₂. Dengan mengintersep sampah daun dan ranting sebelum dibuang ke TPA, emisi gas metana berhasil dicegah, memberikan kontribusi nyata terhadap mitigasi perubahan iklim.
- c. Pengurangan Beban dan Perpanjangan Usia Pakai TPA: Aliran sampah organik yang berkurang menunda penuh kapasitas TPA, sebuah persoalan krusial di banyak kota Indonesia, dengan efek penghematan biaya dan perencanaan pengelolaan jangka panjang yang lebih baik.
- d. Pengurangan Polusi Udara Lokal dari Pembakaran Terbuka: Praktik pembakaran sampah daun secara terbuka menghasilkan polutan PM_{2.5}, CO, dan VOCs yang membahayakan kesehatan masyarakat. Pengelolaan berbasis nilai ekonomis membuka alternatif pengelolaan yang produktif dan memperbaiki kualitas udara lingkungan. Meskipun pengangkutan sampah dari titik kumpul ke fasilitas pengolahan menimbulkan emisi kendaraan, dampaknya jauh lebih kecil dibandingkan manfaat besar dari mitigasi emisi metana dan pengurangan polusi udara.
- e. Tahap Penggunaan (*Use-phase*): Pembakaran di Fasilitas Industri
Energi dari pelet biomassa diekstraksi melalui pembakaran sebagai bahan bakar co-firing di tanur semen, yang dilakukan pada suhu sangat tinggi (>1400°C) sehingga menghasilkan pembakaran sempurna.
- f. Perbandingan Emisi Lingkungan Pelet Biomassa dan Batubara
Pelet biomassa menghasilkan emisi CO₂ yang dikategorikan netral karbon karena karbon dioksida yang dilepaskan setara dengan jumlah yang diserap oleh tanaman selama pertumbuhan. Sebaliknya, batubara melepaskan karbon fosil yang lama tersimpan sehingga menambah secara netto gas rumah kaca atmosfer. Biomassa memiliki kandungan sulfur sangat rendah sehingga emisi SO_x hampir tidak ada, mengurangi risiko hujan asam. Batubara secara signifikan menjadi sumber utama emisi SO_x. Emisi NO_x dihasilkan baik biomassa dan batubara karena suhu pembakaran tinggi menyebabkan pembentukan NO_x thermal. Namun pelet biomassa umumnya menghasilkan emisi yang lebih rendah dari batubara. Keduanya menghasilkan partikulat, namun instalasi pembakaran modern di pabrik semen dilengkapi teknologi pengendali polusi (ESP, baghouse filter) yang menangkap >99% partikulat sebelum dilepas ke udara (23).
Abu hasil pembakaran batubara banyak mengandung bahan berbahaya dan memerlukan pengelolaan khusus, sementara abu biomassa yang dibakar di tanur semen terinkorporasi ke produk klinker dan tidak menjadi limbah. Ini mencerminkan prinsip ekonomi sirkular dan *zero solid waste*. Implementasi model ini secara sistemik memberikan manfaat double untuk mitigasi perubahan iklim melalui dua jalur utama: pengurangan emisi CO₂ di sektor energi dan pencegahan emisi metana dari sektor limbah. Model ini mendukung pencapaian target NDC Indonesia dan pembangunan berkelanjutan (24).

SIMPULAN

Penelitian ini mengkaji pengembangan pelet biomassa dari sampah daun dan ranting sebagai sumber energi terbarukan yang berpotensi menggantikan batubara di Kabupaten Cilacap. Melalui kolaborasi antara PT Solusi Bangun Indonesia (SBI) Cilacap dan Politeknik Negeri Cilacap, pengembangan pelet biomassa ini terbukti teknis dapat dilakukan dengan teknologi densifikasi biomassa yang sudah mapan, meliputi pengumpulan bahan baku melalui partisipasi masyarakat, pencacahan, pengeringan, dan peletisasi. Produk pelet yang dihasilkan memiliki nilai kalor 2.893 Kcal/kg, kadar air 2.64%, kadar abunya relatif tinggi 23.83% yang perlu menjadi perhatian pada fase pembakaran industri.

Dari sisi lingkungan, penggantian batubara dengan pelet biomassa memberikan manfaat ganda dalam mitigasi perubahan iklim, yakni netralitas karbon pada emisi CO₂ dan pengurangan signifikan emisi metana (CH₄) dari sampah organik yang tidak terdegradasi di TPA. Selain itu, pelet ini menghasilkan emisi SO_x dan NO_x yang lebih rendah apabila dibakar di fasilitas dengan teknologi pengendalian emisi. Abu hasil pembakaran biomassa dapat diolah menjadi komponen dalam produksi semen, sehingga menjunjung prinsip ekonomi sirkular dan *zero solid waste*. Analisis SWOT mengungkapkan bahwa keberhasilan implementasi skala besar dipengaruhi oleh ketersediaan bahan

baku melimpah, kepastian pasar melalui dukungan industri, dan kebijakan energi terbarukan. Namun, tantangan seperti variasi kualitas bahan baku, konsumsi energi tinggi pada pengeringan, dan perlunya insentif untuk menjaga partisipasi masyarakat tetap menjadi hambatan utama. Secara keseluruhan, pengembangan pelet biomassa dari sampah daun dan ranting merupakan solusi inovatif dan layak secara teknis serta ramah lingkungan untuk mengurangi ketergantungan batubara sekaligus mengelola sampah perkotaan secara berkelanjutan. Optimalisasi proses produksi, pengelolaan rantai pasok yang efektif, dan dukungan kebijakan menjadi prasyarat penting untuk komersialisasi dan replikasi dalam mendukung transisi energi dan pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

REFERENSI

1. IEA. Indonesia Energy Profile 2023 2023 [Laporan resmi dari International Energy Agency yang memuat data dan profil energi Indonesia tahun 2023]. Available from: <https://www.iea.org/countries/indonesia>.
2. BPS. Statistik Energi Indonesia 2023 [Available from: <https://www.bps.go.id/subject/10/energi.html>].
3. Golomb D. Fossil Fuel Combustion: Air pollution and global warming. Managing Air Quality and Energy Systems: CRC Press; 2020. p. 177-90.
4. Hannun RM, Razzaq AHA, editors. Air pollution resulted from coal, oil and gas firing in thermal power plants and treatment: A review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; 2022: IOP Publishing.
5. Prasetyo MH, Baderan DWK, Hamidu MS. Dampak Kerusakan Lingkungan Akibat Eksploitasi Sumber Daya Mineral dari Kegiatan Pertambangan. Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman. 2025;2(2):01-11.
6. Kehutanan KLHd. Statistik Persampahan Indonesia 2024 Jakarta: KLHK; 2024 [
7. Wahyudi J. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari pembakaran terbuka sampah rumah tangga menggunakan model IPCC. Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan Dan IPTEK. 2019;15(1):65-76.
8. Silva TAL, Varão LHR, Pasquini D. Lignocellulosic Biomass. In: Thomas S, Hosur M, Pasquini D, Jose Chirayil C, editors. Handbook of Biomass. Singapore: Springer Nature Singapore; 2023. p. 1-39.
9. Chandra R, Yadav S, Kumar V. Microbial Degradation of Lignocellulosic Waste and Its Metabolic Products. Environmental Waste Management 2016. p. 249-98.
10. Kuncara J, Jamilatun S, Febriani AV, Idris M, Setyawan M. Potensi dan Tantangan Pemanfaatan Refuse Derived Fuel dalam Co-Firing PLTU di Indonesia: A Review.
11. Wahditiya AA, Semet MM, Nantan Y, Istoto EH, Purnamasari R, Maulana AP, et al. Energi dari Limbah dan Sampah: Teknologi, Kebijakan, dan Implementasi: Yayasan Tri Edukasi Ilmiah; 2025.
12. Rachman RM, Rustan FR, Rahayu DE, Ampangallo BA, Aryadi A, Safar A, et al. Optimalisasi Sistem Pengelolaan Sampah Perkotaan (Strategi dan Implementasi): Tohar Media; 2024.
13. Lina SE. Perancangan Mesin Cetak Pelet Berbasis Teknologi Hybrid: Universitas Medan Area; 2024.
14. Bajwa DS, Peterson T, Sharma N, Shojaeiarani J, Bajwa SG. A review of densified solid biomass for energy production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018;96:296-305.
15. Velázquez Martí B. Aprovechamiento de la biomasa para uso energético: Editorial Universitat Politècnica de València; 2018.
16. Artemio CP, Maginot NH, Serafin CU, Rahim FP, José Guadalupe RQ, Fermín CM. Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. PeerJ. 2018;6:e5504.
17. Carrillo-Parra A, Rutiaga-Quñones JG, Ríos-Saucedo JC, Ruiz-García VM, Ngangyo-Heya M, Nava-Berumen CA, et al. Quality of Pellet Made from Agricultural and Forestry Waste in Mexico. BioEnergy Research. 2022;15(2):977-86.
18. Kougioumtzis MA, Kanaveli IP, Karampinis E, Grammelis P, Kakaras E. Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency. Renewable Energy. 2021;171:516-25.
19. Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG. An overview of the chemical composition of biomass. Fuel. 2010;89(5):913-33.

20. Hossain T, Jones DS, Godfrey E, Saloni D, Sharara M, Hartley DS. Characterizing value-added pellets obtained from blends of miscanthus, corn stover, and switchgrass. *Renewable Energy*. 2024;227:120494.
21. Terzopoulou P, Kamperidou V, Lykidis C. Cypress Wood and Bark Residues Chemical Characterization and Utilization as Fuel Pellets Feedstock. *Forests* [Internet]. 2022; 13(8).
22. Hisham HN, Hale M, Norasikin AL. EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT AND MOISTURE EXCLUSION EFFICIENCY OF ACETYLATED RATTAN (CALAMUS MANAN). *Journal of Tropical Forest Science*. 2014;26(1):32-40.
23. Kawiarto K, Nuryoto N, Irawan A. Pengaruh Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler Pada Pembangkit CFB Batubara Dalam Sistem Co-firing. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*. 2023;9(3):281-96.
24. Rahman R. Optimasi Kinerja, Ekologi dan Ekonomi Pada Biobriket Campuran Batubara dan Arang Kayu Bakau: Universitas Hasanuddin; 2023.