



Biopelet sebagai Bioenergi Masa Depan: Sintesis Teknologi, Kinerja Bahan Bakar, Keberlanjutan dan Kelayakan Ekonomi

Rozalia^{1*}, & Ayulian Sara²

¹ Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Andalas, Indonesia

² Departemen Teknik Industri Pertanian, Fakultas Teknik dan Teknologi, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

ABSTRAK

Biopelet merupakan bahan bakar padat terbarukan yang dihasilkan melalui pemadatan biomassa, seperti limbah pertanian, residu kehutanan dan bahan organik lainnya. Artikel ini membahas mengenai potensi biopelet sebagai bagian dari transisi menuju sistem energi rendah karbon dengan meninjau teknologi produksi, kinerja bahan bakar, keberlanjutan, dan kelayakan ekonomi. Proses produksi umumnya mencakup pengeringan, pengecilan ukuran, pengkondisian bahan, pemadatan dan pendinginan. Kualitas produk dipengaruhi oleh jenis biomassa, kadar air, ukuran partikel, tekanan, suhu, serta penggunaan bahan pengikat. Proses praperlakuan, termasuk torrefaksi dapat meningkatkan densitas energi dan ketahanan terhadap air, tetapi menambah kebutuhan energi dan biaya proses. Penilaian kinerja biopelet di nilai melalui nilai kalor, kadar air, kadar abu, densitas, kekuatan mekanis dan emisi selama pembakaran. Bahan baku dengan kadar abu rendah dapat mendukung pembakaran lebih stabil dan mengurangi masalah kerak dan residu. Dari sisi keberlanjutan, pemanfaatan limbah dapat mengurangi pembakaran terbuka dan memperluas penggunaan sumber daya local, asalkan pengambilannya tidak mengganggu kesuburan tanah, fungsi ekosistem atau kebutuhan alternatif biomassa. Kelayakan ekonomi ditentukan oleh harga dan kontinuitas pasokan bahan baku, skala fasilitas, biaya energi, investasi peralatan, serta akses pasar dan distribusi. Karena itu, biopelet berpotensi menjadi pilihan bioenergi yang bermanfaat, tetapi manfaatnya tidak otomatis berlaku untuk semua bahan baku dan lokasi. Pengembangan yang kompetitif memerlukan standarisasi mutu, analisis daur hidup dan biaya yang transparan, serta pemilihan teknologi sesuai karakteristik bahan dan kebutuhan pengguna. Evaluasi terpadu tersebut penting untuk menentukan kondisi ketika biopelet layak secara teknis, lingkungan dan ekonomi.

KATA KUNCI

Biomassa pertanian; biopelet; bioenergi; kinerja bahan bakar; kelayakan ekonomi.

PENULIS KORESPONDEN

Alamat e-mail penulis koresponden: rozalia@ae.unand.ac.id

1. Pendahuluan

Limbah pertanian merupakan salah satu sumber biomassa terbesar di Indonesia, tetapi pemanfaatannya sebagai energi bersih masih menghadapi persoalan secara teknis maupun ekonomi. Biomassa yang dibakar tanpa proses pemadatan memiliki densitas yang rendah sehingga memerlukan biaya transportasi dan penyimpanan yang tinggi. Densifikasi merupakan proses pemadatan biomassa menjadi biopelet dengan pemberian tekanan [1]. Densifikasi dapat mengatasi masalah penanganan biomassa, seperti meningkatkan kemudahan penyimpanan, meningkatkan densitas, memberikan kestabilan mekanis, dan kesesuaian bahan untuk sistem pembakaran atau konversi termokimia. Pada saat yang sama, meningkatnya permintaan terhadap pelet kayu dan keterbatasan sumber daya kayu mendorong pengembangan pelet berbasis biomassa non kayu, termasuk jerami, sekam, tongkol, limbah perkebunan, dan residu pengolahan hasil pertanian [2].

Komponen penting dalam produksi energi terbarukan dengan tetap memperhatikan keberlanjutan adalah dengan memanfaatkan limbah dari sektor pertanian yang dapat berfungsi sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan sesuai untuk bahan bakar fosil. Dalam studi ini, limbah pertanian dikonversi menjadi energi berupa biopelet. Biopelet merupakan bahan bakar padat yang dihasilkan melalui pengecilan ukuran dan densifikasi biomassa dengan atau tanpa penggunaan bahan perekat [3]. Pada dasarnya, kualitas biopelet tidak hanya ditentukan oleh nilai kalor saja tetapi kadar air, kadar abu, *volatile matter*, ukuran partikel, ketahanan terhadap abrasi serta sifat pembakaran dan emisi. Karakteristik ini tentunya



bergantung pada sifat kimia bahan baku dan kondisi operasi, karena perbandingan campuran bahan baku dapat menghasilkan perbedaan besar dalam mutu biopellet bahkan ketika bahan baku berasal dari sektor pertanian [4].

Konsep ekonomi sirkular menjadi sebuah model alternatif dan komplementer terhadap ekonomi linier tradisional, peluang untuk mengurangi limbah dengan cara menggunakan kembali material, dan mendaur ulang sumber daya secara lebih efisien [5]. Menurut Kirchherr et.al, ekonomi sirkular bertujuan untuk menghilangkan konsep akhir penggunaan produk melalui pengurangan, penggunaan kembali dan daur ulang produk sehingga memaksimalkan ekonominya sekaligus mempromosikan keberlanjutan lingkungan dan sosial. Studi mengenai ekonomi sirkular banyak menekankan peran investasi dalam mendorong inovasi hijau dengan meningkatkan produktivitas sumber daya, dan mendukung stabilitas ekonomi jangka panjang di negara-negara berkembang [6].

Oleh karena itu pertanyaan utamanya bukan sekedar apakah biopellet dapat diproduksi, melainkan apakah biopellet tersebut dapat berfungsi sebagai pembawa energi masa depan yang berskala besar, berkelanjutan, efektif secara teknis, dan kompetitif secara ekonomi. Artikel ini bertujuan untuk mensintesis perkembangan teknologi produksi biopellet, karakteristik dan kinerja bahan bakar, aspek keberlanjutan lingkungan, serta kelayakan ekonomi biopellet sebagai sumber bioenergi masa depan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa kata kunci yang dianggap berkaitan dengan topik yang dibahas seperti *biopellet production, agricultural waste biomass, biomass densification circular economy, valorization bioenergy, dan environmental sustainability*. Literatur yang digunakan dalam penulisan ini bersumber dari basis data *Semantic Scholar, sciedirect, dan Web of Science (WOS)* dengan tahun terbit 2010-2026. Artikel dikumpulkan dan di *screening* secara menyeluruh untuk menjadi dasar dari penulisan artikel ini.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Biomassa Pertanian

Hasil Biomassa pertanian merupakan material organik yang berasal dari kegiatan budidaya, pemanenan, pengolahan hasil pertanian, serta aktivitas agroindustri. Biomassa tersebut dapat berasal dari residu tanaman seperti jerami padi, sekam padi, tongkol dan batang jagung, bagas tebu, tandan kosong kelapa sawit, kulit kopi, kulit kakao, tempurung kelapa, serta berbagai limbah hasil pengolahan komoditas pertanian. Komponen dasar dari limbah pertanian berupa kandungan selulosa, hemiselulosa dan lignin sehingga berpotensi menjadi bahan baku bioenergi. Sumber biomassa pertanian dapat dikelompokkan berdasarkan tahapan terbentuknya residu. Residu dapat dihasilkan pada tahap produksi tanaman, pemanenan, maupun pengolahan hasil pertanian.

3.2 Karakteristik Bahan Baku

Pada produksi biopellet perlu diperhatikan karakteristik dari kualitas bahan baku yang digunakan.

Tabel 1. Karakteristik bahan baku dan pengaruhnya terhadap biopellet yang dihasilkan.

Karakteristik	Pengaruh Utama	Karakteristik yang diinginkan	Catatan penting
Kadar Air	Kandungan air pada biopellet dapat menghabiskan sebagian panas untuk penguapan, sehingga efisiensi dan performa pembakaran turun, kadar	Rendah, tetapi bahan tetap mengandung sedikit air untuk proses pemadatan yang baik	Rentang optimum bergantung pada bahan baku dan proses, berdasarkan SNI kadar air tidak boleh melebihi 12%.



Karakteristik	Pengaruh Utama	Karakteristik yang diinginkan	Catatan penting
	air tinggi juga dapat meningkatkan asap		
Ukuran Partikel	Mengubah perilaku pemadatan, kerapatan, kekuatan mekanis dan karakter pembakaran pelet. Partikel yang lebih halus dapat meningkatkan kerapatan serta kekuatan pada kondisi tertentu.	Ukuran cukup halus dan relatif seragam, tetapi kondisi terbaik harus ditentukan untuk bahan baku dan alat yang digunakan.	Ukuran partikel memberikan kerapatan tertinggi.
Lignin	Dapat melunakkan bahan saat pemanasan dan membantu ikatan antar partikel, sehingga berkontribusi pada kekuatan dan kekerasan biopellet.	Kandungan dan kondisi proses yang cukup dapat membantu ikatan, bukan berarti lignin harus dimaksimalkan tanpa mempertimbangkan komposisi lain.	Kinerja ikatan juga dipengaruhi oleh komponen lain, temperatur, tekanan dan perlakuan bahan.
Selulosa/hemiselulosa	Keduanya merupakan bagian utama dari matriks lignoselulosa; selulosa dapat memberikan kekuatan pada pelet, sementara selulosa berperan dalam degradasi termal.	Komposisi seimbang dengan lignin sesuai dengan tujuan kekuatan pelet dan karakter pembakaran.	Selulosa dan hemiselulosa tidak dapat dihubungkan dengan nilai kalor. Sedangkan nilai kalor biopellet ditentukan dengan kadar air dan kadar abu.
Kadar Abu	Abu merupakan residu mineral setelah pembakaran. Komposisinya dapat mempengaruhi mutu bahan bakar, residu dan kecenderungan pembentukan kerak. Abu tinggi dapat menurunkan nilai kalor.	Rendah, terutama untuk mengurangi residu dan masalah operasi pembakaran.	Dampaknya tergantung pada komposisi mineral abu, bukan hanya persentase total abu.
Nilai Kalor	Menunjukkan energi panas yang dapat dilepas per satuan massa bahan bakar, nilai kalor yang tinggi berarti potensi energi lebih besar.	Tinggi pada basis pengukuran yang sama, bandingkan nilai kalor bersih/kotor serta basis basah/kering secara konsisten	Kadar air yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor pembakaran begitupun dengan kadar abu bahan baku.

Berdasarkan Tabel 1 komponen lignoselulosa merupakan salah satu faktor yang penting, namun tetap diperhatikan setiap biomassa memiliki perbedaan kandungan lignoselulosanya sehingga nilai kalor yang dihasilkan akan berbeda pula. Oleh karena itu, perbedaan komposisi kimia dapat menghasilkan respon terhadap proses densifikasi. Sehingga metode *pretreatment* merupakan tahapan penting untuk meningkatkan efisiensi konversi biomassa menjadi bioenergi [7], [8].

3.3 Tantangan Pemanfaatan Biomassa

Meskipun memiliki potensi yang besar namun pemanfaatan biomassa pertanian tetap menghadapi berbagai kendala. Salah satunya ketersediaan biomassa yang bersifat tersebar dan musiman. Sehingga biomassa yang digunakan untuk produksi biopellet akan menghasilkan karakteristik yang berbeda dan dapat mempengaruhi konsistensi kualitas produk akhir. Limbah pertanian dibedakan menjadi limbah pertanian primer dan sekunder. Besarnya pada sisa pertanian primer diperkirakan berdasarkan luas budidaya tanaman, produksi, rasio hasil sisa tanaman dan ketersediaan sisa tanaman. Penelitian Ahmudi et.al menunjukkan total potensi energi limbah pertanian untuk biopellet di Indonesia sebesar 2.708 juta GJ/tahun atau setara dengan potensi daya listrik sebesar 23.693 MW. Potensi ini memberikan harapan untuk pemenuhan energi pembangkit listrik yang awalnya berasal dari batu bara. Oleh karena itu, pengembangan sistem pemanfaatan limbah pertanian memerlukan pendekatan yang mengintegrasikan antara karakteristik bahan baku, teknologi konversi, logistik, ekonomi dan aspek lingkungan.



3.4 Teknologi Proses Produksi biopelet

Proses produksi biopelet umumnya meliputi persiapan biomassa, pengeringan, pengecilan ukuran, pencampuran perekat, pencetakan, pendinginan, pengemasan, dan pengujian mutu.

Persiapan biomassa

Kadar air merupakan parameter penting karena mempengaruhi kemampuan partikel untuk membentuk ikatan selama peletisasi. Kehadiran air dalam jumlah optimal memicu ikatan hidrogen dan pelunakan biopolimer, sedangkan penyimpangan di luar ambang batas kritis dapat merusak keutuhan struktur pelet. Sehingga sampel yang akan diproses harus dalam kondisi kadar air rendah.

Pengeringan

Proses ini merupakan fase kedua setelah persiapan biomassa. Proses ini dilakukan untuk mengontrol kadar air pada bahan. Kadar air rata-rata bahan baku berkisar antara 30 hingga 60% yang pada dasarnya mendukung proses pembuatan pelet. Kadar air yang tinggi akan menyebabkan penurunan nilai kalor pada biopelet. Sebagian literatur menyimpulkan bahwa produk berkualitas baik umumnya berada pada 10-15%, sementara beberapa percobaan melaporkan nilai optimum 12% untuk serbuk gergaji dan jerami jagung, 14% untuk kulit kacang, 15% untuk *hardwood* dan *wheat straw*, serta 10% untuk *softwood*. Beberapa studi bahkan menemukan titik terbaik yang lebih sempit untuk aplikasi tertentu, seperti 6-8% untuk pembakaran optimum, 8-9% untuk akumulasi panas tertinggi, atau sekitar 8.7-9.3% pada pelet bambu. Sehingga kisaran kadar air 7-15% tepat untuk memastikan kualitas pelet yang lebih baik, pembakaran yang efisien, dan pengurangan emisi gas buang dibandingkan dengan bahan bakar yang memiliki kadar air yang tinggi.

Pengecilan ukuran

Ukuran partikel mempengaruhi kemampuan biomassa untuk mengisi ruang antar partikel dan membentuk pellet yang lebih kompak. Sehingga dapat meningkatkan densitas dan kekuatan mekanik pellet tersebut. Semakin kecil ukuran partikel bahan baku maka akan semakin besar densitas dari biopelet tersebut. Hal ini juga dapat mempengaruhi penyerapan air.

Pencampuran perekat

Pencampuran bahan pengikat dapat dilakukan bila karakteristik lignin alami dalam biomassa tidak cukup untuk membentuk pellet yang kuat. Penelitian Rozalia et.al menggunakan bahan pengikat alami yang berasal dari kayu sengon dengan kandungan lignin sebesar 23,96%.

Peletisasi

Pembuatan pelet mengacu pada proses peningkatan densitas energi biomassa melalui konversi menjadi pelet berbentuk silindris. Peletisasi dilakukan dengan pemberian tekanan kepada bahan baku dengan suhu tinggi. Pemanasan didalam cetakan dapat meningkatkan suhu pelet, sehingga menyebabkan uap air menguap dari pelet. Penggunaan suhu tinggi selama proses peletisasi dapat menyebabkan lignin, komponen pada bahan menjadi lunak sehingga membentuk ikatan antar partikel dan mengeras setelah pengkondisian. Sehingga menyebabkan densitas pada biopelet semakin tinggi. Setelah pelet terbentuk, pelet didinginkan pada suhu ruang untuk menurunkan suhu dan mengurangi kadar air. Proses penyimpanan ini sangat penting untuk memastikan bahwa pelet memperoleh sifat dengan kekuatan tinggi dan dapat mempermudah saat penyimpanan. Proses kompresi dan pengeringan ini akan menghasilkan pelet biomassa berkualitas



tinggi yang cocok untuk berbagai aplikasi. Pelet dengan densitas yang tinggi akan mempunyai kekuatan mekanik yang lebih besar dan potensi pemulihan yang lebih baik dilingkungan yang lembab.

3.5 Sintesis Teknologi Peletisasi

Proses densifikasi mengubah limbah lignoselulosa berdensitas rendah menjadi bahan bakar berdensitas energi tinggi melalui optimalisasi parameter mekanis dan termokimia. Integrasi perlakuan awal seperti torefaksi kering, karbonisasi hidrotermal, dan ledakan uap secara signifikan memodifikasi struktur polimer biomassa. Torefaksi terintegrasi meningkatkan hidrofobisitas biomassa dan memfasilitasi kemudahan pembentukan pelet padat. Penggunaan mesin cetak pelet rol vertikal (*vertical roller press*) pada biomassa sorgum dan sekam padi mencapai efisiensi peletisasi 98,80% dengan susut massa minimal. Perlu diperhatikan bahwa integrasi teknologi pra-perlakuan termokimia dan modifikasi pencampuran (*co-pelletization*) terbukti meningkatkan efisiensi energi serta kualitas bahan bakar secara signifikan. Menurut Sarker et.al, kombinasi torefaksi dan ko-densifikasi meningkatkan densitas energi dan sifat hidrofobisitas tanpa memerlukan temperatur maupun tekanan ekstrim [9]. Seperti hal nya penambahan limbah biomassa seperti limbah cangkang pada serbuk gergaji mampu menekan konsumsi energi pemadatan dari 0,18 kWh/kg menjadi 0,09 kWh/kg.

3.6 Kualitas dan kinerja bahan bakar biopelet

Kualitas biopelet merupakan kombinasi antara sifat fisik, mekanik, kimia dan termal yang menentukan bahan tersebut memberikan kemudahan penanganan, penyimpanan, transportasi serta performa selama pembakaran. Proses peletisasi dapat menghasilkan bahan bakar dengan ukuran dan bentuk yang lebih seragam serta densitas yang lebih tinggi. Proses ini memungkinkan residu biomassa yang memiliki densitas rendah dikonversi menjadi bahan bakar yang lebih mudah ditangani dan memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi [10]. Biopelet yang baik ditentukan oleh interaksi antara karakteristik bahan baku, formulasi, ukuran partikel, kadar air, tekanan, temperatur pengempaan serta kondisi proses peletisasi. Kualitas biopelet dinilai dari nilai kalor, kadar air, kadar abu, densitas curah dan ketahanan mekanis. Pada proses pembakaran, mutu tersebut harus dilengkapi dengan efisiensi alat, kestabilan nyala, emisi serta risiko kerak. Sehingga biopelet yang baik tidak hanya dilihat dari nilai kalor yang tinggi, tetapi juga cocok dengan tungku atau boiler yang akan digunakan. Hal ini dapat menghemat biaya perawatan boiler tersebut [11].

Kadar air yang rendah sangat baik pada biopelet, karena kelebihan air dapat menimbulkan hilangnya energi selama penguapan, sehingga energi efektifnya semakin rendah. Namun, jika kepadatan dan ketahanan mekanis tinggi akan mempermudah proses pengangkutan dan penyimpanan sehingga meminimalkan pembentukan butiran halus yang tercecer. Sehingga perlakuan pendahuluan juga dapat digunakan untuk meningkatkan mutu. Perlakuan hidrotermal terhadap limbah pertanian dilaporkan mampu meningkatkan sifat fisik dan durabilitas pelet karena dapat memodifikasi struktur hemiselulosa, selulosa dan lignin. Kinerja biopelet sebagai bahan baku ditentukan oleh faktor-faktor seperti nilai kalor, karakteristik penyalan, laju pembakaran, waktu pembakaran, dan emisi. Nilai kalor menunjukkan energi yang tersedia per satuan massa bahan bakar, sedangkan kadar zat mudah menguap dan karbon mempengaruhi tahap penyalan dan pembakaran [12].

Biomassa pertanian berbeda dengan biomassa kayu dalam beberapa hal, terutama kandungan mineral dan abu yang lebih tinggi. Abu yang mengandung unsur-unsur seperti Kalium (K), Natrium (Na), silika (Si), klorin (Cl), dan fosfor (P) dapat menyebabkan masalah seperti kerak, pengotoran, aglomerasi dan endapan pada peralatan pembakaran, yang pada akhirnya dapat mengurangi efisiensi pengoperasian. Perbedaan karakteristik bahan baku pada akhirnya menimbulkan variasi kinerja energi dan lingkungan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pelet berbasis biomassa pertanian dapat



menghasilkan keluaran panas yang berbeda dibandingkan dengan pelet kayu. Strategi seperti mencampurkan berbagai jenis biomassa, kadar air terkontrol dan ukuran partikel dengan memanfaatkan perekat, dan menerapkan pengolahan hidrotermal atau torefaksi sehingga dapat meningkatkan karakteristik bahan bakar [13], [14]. Oleh karena itu, biopelet berkualitas tinggi tidak hanya ditentukan oleh nilai kalor nya tetapi juga kandungan air dan abu yang terkendali, kepadatan dan ketahanan mekanik yang baik, pembakaran yang stabil, emisi yang dapat dikelola, dan kecenderungan rendahnya pembentukan kerak dan endapan. Penerapan terpadu antara pencampuran biomassa, densifikasi berbantu perekat, serta modifikasi termokimia terbukti mengubah heterogen menjadi bahan bakar padat terstandarisasi dengan densitas energi tinggi.

3.7 Keberlanjutan dan Dampak Lingkungan

Pemanfaatan dan produksi biopelet biomassa dari limbah organik untuk pembangkitan energi dapat secara signifikan mengurangi volume limbah organik. Proses ini tentu dapat mengurangi produksi limbah, meminimalkan dampak lingkungan dari pembuangan limbah, dan mengurangi emisi metana yang tidak diinginkan yang dilepaskan selama dekomposisi bahan organik di tempat pembuangan sampah. Pemanfaatan biomassa limbah pertanian dapat menghentikan kebiasaan pembakaran terbuka pada lahan pertanian yang kerap memicu polusi udara secara regional. Praktik-praktik tersebut secara tidak langsung berkontribusi pada ekonomi sirkular dengan memfasilitasi transformasi limbah biomassa menjadi sumber daya energi yang bernilai tambah. Pendekatan ini mendorong pemulihan sumber daya sekaligus meningkatkan efisiensi material [15]. Biomassa yang diolah menjadi sumber energi terintegrasi dalam sistem siklus tertutup dengan memanfaatkan limbah sepenuhnya, mendorong ketahanan ekonomi dan memastikan keberlanjutan lingkungan. Namun, analisis dampak lingkungan yang komprehensif sangat penting dilakukan, karena pembakaran pelet biomassa umumnya menghasilkan emisi yang lebih rendah. Sebaliknya, bahan bakar fosil dapat mengeluarkan karbon yang lebih besar. Sehingga penggantian bahan bakar fosil dengan biomassa merupakan keputusan terbaik karena dapat mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan [16].

Tabel 2. Perbandingan emisi yang dihasilkan dari bahan bakar biopelet dan bahan bakar fosil.

Aspek emisi	Biopelet	Bahan Bakar Fosil
Gas Rumah kaca	Pembakaran 100% pelet kayu menghasilkan emisi daur hidup 91% lebih rendah dari pada batu bara dan 78% lebih rendah daripada pembangkit gas [17].	Batu bara dan pembangkit gas memiliki emisi lebih tinggi daripada pelet kayu pada skenario dan batas sistem studi tersebut.
Perbandingan emisi gas rumah kaca berbasis jenis bahan baku	Untuk pelet tongkol jagung, emisi daur hidup yang dimodelkan adalah 240 g CO ₂ e/kWh – 40% dibahas pembangkit gas dan 80% dibawah batu bara [18].	Pembangkit gas dan batu bara menghasilkan emisi daur hidup lebih tinggi daripada pelet pada skenario yang dianalisis.
Polutan udara : NO _x , SO _x dan Partikulat	Pelet dapat mengurangi NO _x 30% dan SO _x 97% serta PM ₁₀ 75% dibanding batu bara Pelet kayu dapat mengurangi NO _x mencapai 78,9-90%, SO _x 95 – 99,6% dan total partikel tersuspensi 70,3 – 87,2% [19].	Batu bara pada perbandingan tersebut menjadi acuan emisi lebih tinggi untuk ketiga polutan.



Aspek emisi	Biopelet	Bahan Bakar Fosil
CO ₂ saat pembakaran dan penghitungan karbon biogenik	CO ₂ tetap keluar dari cerobong ketika pelet dibakar. Penilaian dapat memberikan hasil berbeda jika karbon yang diserap saat pertumbuhan dianggap mengimbangi emisi pembakaran [20].	Pembakaran batu bara dan gas dapat melepaskan karbon fosil yang tersimpan di bawah tanah.

Berdasarkan Tabel 2, penilaian daur hidup menemukan biopelet dari limbah biomassa memiliki emisi rumah kaca yang lebih rendah daripada penggunaan gas dan batu bara. Namun, biopelet tersebut tetap harus diperhatikan proses produksi, penyimpanan, transportasi, serta cara menghitung karbon biomassa tersebut.

3.8 Kelayakan ekonomi

Kelayakan ekonomi produksi biopelet sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain ketersediaan dan harga bahan baku, kapasitas produksi, investasi peralatan, biaya energi, tenaga kerja, transportasi, pengeringan, dan harga jual biopelet. Biomassa pertanian menawarkan keuntungan karena terdiri dari residu agroindustri dan produk sampingannya. Namun, biaya pengumpulan dan transportasi bisa jadi mahal karena sisa-sisa pertanian biasanya tersebar dan memiliki kepadatan yang rendah [21]. Studi tekno ekonomi pada produksi biopelet umumnya menghasilkan nilai finansial positif, terutama bila memanfaatkan limbah biomassa dan skala pabrik yang optimal. Walaupun demikian, margin profitabilitasnya sangat rentan terhadap fluktuasi biaya logistik, kadar air bahan baku, serta kepastian harga pasar. Ketika menilai investasi dan profitabilitas, produksi biopelet dapat dievaluasi dengan menggunakan indikator seperti *Net Present Value* (NPV), *internal Rate of Return* (IRR), *payback period* (PBP), *Benefit-cost ratio* (B/C), *Break-Even Point* (BEP), dan harga jual minimum (MSP) [22].

Studi yang dilakukan oleh Sarker et.al mengenai produksi biopelet bahan bakar torrefaksi dari sisa pertanian dengan kapasitas 40.080 ton per tahun menunjukkan bahwa analisis arus kas yang didiskontokan dapat digunakan untuk mengetahui biaya modal, biaya operasional, harga jual minimum, dan laba atas investasi. Dalam studi ini, harga jual minimum pelet berkisar anatas US\$103,4 hingga US\$105,1 per ton, sedangkan IRR ditemukan antara 22% dan 25% dengan tingkat diskon 10%. Analisis juga menunjukkan bahwa biaya tenaga kerja merupakan salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap NPV dan harga jual minimum. Skala kapasitas memainkan peranan penting dalam menekan biaya satuan biopelet melalui efisiensi volume. Pada fasilitas kecil seperti unit biogas berbasis peternakan (kapasitas ~500 kWe), pemrosesan digestat menjadi biopelet seringkali kurang menguntungkan tanpa konsolidasi bahan baku.

Peluang ekonomi biopelet didorong oleh pergeseran ke arah bahan bakar rendah karbon di sektor industri dan pemanas rumah tangga. Di pasar domestik negara berkembang seperti Indonesia, pemanfaatan limbah perkebunan kelapa sawit dan kulit durian sangat melimpah namun menghadapi tantangan standar kualitas teknis. Kadar abu biopelet tandan kosong kelapa sawit kerap melebihi ambang batas SNI, sehingga memerlukan substitusi seperti tempurung kelapa atau aditif pengikat. Selain itu, serapan pasar lokal masih terhambat pada disparitas regulasi harga dan kurangnya mandat penggunaan biopelet langsung di tingkat nasional. Di Indonesia, lebih dari 90% permintaan biopelet saat ini masih bergantung pada pasar ekspor seperti Jepang dan Korea Selatan:

4. Kesimpulan

Biomassa pertanian memiliki potensi besar untuk dikembangkan menjadi biopelet sebagai bahan bakar terbarukan dan merupakan produk bernilai tambah dalam agroindustri dan ekonomi sirkular. Kualitas dan kinerja biopelet sangat



dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku serta kondisi proses produksi, kadar air, densitas, durabilitas, kadar abu, nilai kalor dan karakteristik pembakaran menjadi parameter utama yang menentukan kelayakan penggunaannya sebagai bahan bakar. Teknologi peningkatan kualitas biopelet dapat dilakukan dengan mencampurkan berbagai jenis biomassa, kadar air terkontrol dan ukuran partikel dengan memanfaatkan perekat, dan menerapkan pengolahan hidrotermal atau torefaksi. Disisi lain keberhasilan pengembangan biopelet tidak hanya ditentukan oleh kualitas produk, tetapi juga oleh efisiensi logistik, ketersediaan bahan baku, kapasitas dan utilitas fasilitas produksi, konsumsi energi, investasi, biaya operasi serta harga jual. Oleh karena itu, pengembangan biopelet dari biomassa pertanian perlu menggunakan pendekatan terpadu. Pendekatan ini dapat menghubungkan teknologi produksi, kinerja energi, keberlanjutan, pertimbangan rantai pasok, dan faktor ekonomi.

5. Referensi

- [1] E. Ningsih, K. Udyani, A. Budianto, N. Hamidah, and S. Afifa, "Pengaruh Ukuran Partikel Arang dari Limbah Tutup Botol Plastik terhadap Kualitas Briket," *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, vol. 36, no. 2, p. 101, Dec. 2020, doi: 10.20543/mkkip.v36i2.6140.
- [2] X. Guan *et al.*, "The Effect of Microwave Pretreatment on The Moisture Content Window and Particle Properties during The Densification of Bamboo Biomass," *Ind. Crops Prod.*, vol. 250, p. 124014, Aug. 2026, doi: 10.1016/j.indcrop.2026.124014.
- [3] A. Greinert, M. Mrówczyńska, R. Grech, and W. Szefer, "The Use of Plant Biomass Pellets for Energy Production by Combustion in Dedicated Furnaces," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 2, p. 463, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13020463.
- [4] P. Pradhan, O. Mohan, V. Kurian, and A. Kumar, "Production and Quality Analysis of Biofuel Pellets from Canadian Forest and Agricultural Biomass," *Biomass Bioenergy*, vol. 194, p. 107697, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.107697.
- [5] N. Ungureanu, V. Vladut, G. Voicu, M.-N. Dinca, and B.-S. Zabava, "Influence of Biomass Moisture Content on Pellet Properties - Review," May 2018. doi: 10.22616/ERDev2018.17.N449.
- [6] X. Jiang *et al.*, "Effect of Moisture Content during Preparation on The Physicochemical Properties of Pellets Made from Different Biomass Materials," *Bioresources*, vol. 15, no. 1, pp. 557–573, Dec. 2019, doi: 10.15376/biores.15.1.557-573.
- [7] R. Samuelsson, S. H. Larsson, M. Thyrel, and T. A. Lestander, "Moisture Content and Storage Time Influence The Binding Mechanisms in Biofuel Wood Pellets," *Appl. Energy*, vol. 99, pp. 109–115, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.05.004.
- [8] A. Ahmudi, I. Garniwa, C. Hudaya, S. M. Nur, and A. Sugiyono, "Multi-Regional Analysis of Biomass Agriculture Waste Potential and Bio-Pellet Development for Electricity in Indonesia," in *AIP Conf. Proc*, 2024, p. 050004. doi: 10.1063/5.0203364.
- [9] S. Wulandari, S. Sumanto, and S. Saefudin, "Pengelolaan Biomassa Tanaman dalam Bioindustri Perkebunan Mendukung Pengembangan Bioenergi Plant Biomass Management in Plantations Bioindustry Supporting Bioenergy Development," *Perspektif*, vol. 18, no. 2, p. 135, May 2020, doi: 10.21082/psp.v18n2.2019.135-149.
- [10] J. Liu, X. Jiang, Z. Li, H. Gu, and T. Li, "Insights into The Pelletization Behaviors of Artificial Lignocellulosic Biomass Based on Cellulose, Hemicellulose and Lignin: A Simplex Lattice Mixture Design Approach," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 280, p. 136000, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.136000.
- [11] D. Permatasari, W. Rahmawati, and A. Haryanto, "Pengaruh Ukuran Partikel dan Perekat Taipoka terhadap Sifat Biopelet dari Limbah Serbuk Gergajian," *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*, vol. 2, no. 2, p. 241, Jun. 2023, doi: 10.23960/jabe.v2i2.7469.



- [12] R. Rozalia, M. Romli, and G. Pari, "Pengaruh Komposisi Jerami Padi dan Kayu Sengon terhadap Kualitas Biopellet sebagai Sumber Energi Alternatif," *Jurnal Teknotan*, vol. 20, no. 1, pp. 167–174, Apr. 2026, doi: 10.24198/jt.vol20n1.18.
- [13] W. A. Rahman, I. F. Suri, I. G. Febryano, B. Saputra, Duryat, and W. Hidayat, "Optimizing Calliandra (*Calliandra calothyrsus*) Biomass Pellets: Impact of Particle Size and Bark Composition," *Global Forest Journal.*, vol. 2, no. 02, pp. 133–146, Jul. 2024, doi: 10.32734/gfj.v2i02.15735.
- [14] G. Ginini *et al.*, "Valorization of Agricultural Residues: Different Biorefinery Routes," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 4, p. 105435, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105435.
- [15] J. Kirchherr, D. Reike, and M. Hekkert, "Conceptualizing The Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 127, pp. 221–232, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [16] Y. Ben Romdhane and N. Belkhir, "Circular Economy Strategies for Sustainable Economic Stability: Evidence from MENA Economies," *Social Sciences & Humanities Open*, vol. 14, p. 103598, Dec. 2026, doi: 10.1016/j.ssaho.2026.103598.
- [17] M. Saleem, "Possibility of Utilizing Agriculture Biomass as a Renewable and Sustainable Future Energy Source," *Heliyon*, vol. 8, no. 2, p. e08905, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e08905.
- [18] P. Pradhan, S. M. Mahajani, and A. Arora, "Production and Utilization of Fuel Pellets from Biomass: A Review," *Fuel Processing Technology*, vol. 181, pp. 215–232, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.fuproc.2018.09.021.
- [19] V. Karkania, E. Fanara, and A. Zabaniotou, "Review of Sustainable Biomass Pellets Production – A Study For Agricultural Residues Pellets' Market In Greece," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 3, pp. 1426–1436, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.11.028.
- [20] N. Y. Harun, A. M. Parvez, and M. T. Afzal, "Process and Energy Analysis of Pelleting Agricultural and Woody Biomass Blends," *Sustainability*, vol. 10, no. 6, p. 1770, May 2018, doi: 10.3390/su10061770.
- [21] S. Lavergne, Sylvia. H. Larsson, D. D. S. Perez, M. Marchand, M. Campargue, and C. Dupont, "Effect of Process Parameters and Biomass Composition on Flat-Die Pellet Production from Underexploited Forest and Agricultural Biomass," *Fuel*, vol. 302, p. 121076, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121076.
- [22] T. R. Sarker, S. Nanda, V. Meda, and A. K. Dalai, "Densification of Waste Biomass for Manufacturing Solid Biofuel Pellets: A Review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 231–264, Feb. 2023, doi: 10.1007/s10311-022-01510-0.