© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1349-1363 *ISSN 1829-8907*

Kajian Kuantitatif Potensi Limbah Organik dan Panas Sisa Industri sebagai Sumber Daya Ekonomi Sirkular di Kabupaten Indramayu

Rian Fajar Aritonang[1*], Iwan Setiawan[2], dan Johan Iskandar[3]

[1]Departemen Ilmu Keberlanjutan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Padjadjaran, Indonesia; e-mail: rian12002@mail.unpad.ac.id
[2]Departemen Sosial Ekonomi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran, Indonesia
[3]Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran, Indonesia

ABSTRAK

Pengelolaan limbah organik yang tidak optimal dan pemborosan energi panas dari sektor industri merupakan dua permasalahan lingkungan yang saling terkait namun jarang dikaji secara terintegrasi dalam satu kerangka penilaian kuantitatif. Penelitian ini bertujuan mengkaji secara kuantitatif potensi limbah organik dan panas sisa industri sebagai sumber daya ekonomi sirkular di Kabupaten Indramayu. Metode yang digunakan adalah analisis data sekunder berbasis kalkulasi terstruktur, mencakup estimasi potensi limbah dari sektor pertanian, peternakan, dan rumah tangga, serta estimasi panas sisa industri dari Kilang Pertamina RU VI Balongan. Hasil penelitian menunjukkan total potensi limbah organik yang dapat dimanfaatkan mencapai 2.449.876 ton/tahun, terdiri dari limbah pertanian 2.045.752 ton/tahun, limbah peternakan 156.435 ton/tahun, dan limbah rumah tangga 247.689 ton/tahun. Potensi panas sisa yang dapat dipulihkan diestimasi sebesar 1,44–3,3 juta GJ/tahun, cukup untuk mendukung proses pengeringan biomassa dan aktivasi zeolit dalam sistem produksi pupuk organik. Integrasi kedua sumber daya ini berpotensi menghindari emisi gas rumah kaca sebesar 97.995–244.988 ton CO_2e/tahun pada skenario moderat (tingkat pemanfaatan 20%), dengan basis perhitungan *total usable biomass* sebesar 2.449.876 ton per tahun dan faktor emisi 0,2–0,5 ton CO_2e/ton, serta meningkatkan sekuestrasi karbon tanah sebesar 92.000 ton CO_2/tahun. Dari sisi ekonomi, model ini memproyeksikan pendapatan sebesar Rp 293,99 miliar per tahun dengan *Net Present Value* sebesar Rp1,79 triliun selama 10 tahun pada skenario moderat, meskipun angka tersebut bersifat *theoretical upper bound* yang memerlukan kalibrasi lebih lanjut pada implementasi nyata. Temuan ini menegaskan bahwa Kabupaten Indramayu memiliki basis sumber daya yang komplementer dan signifikan untuk pengembangan sistem ekonomi sirkular lintas sektor.

***Kata kunci*:** limbah organik, panas sisa industri, ekonomi sirkular, mitigasi emisi gas rumah kaca, sekuestrasi karbon

ABSTRACT

Suboptimal organic waste management and industrial waste heat dissipation represent two interrelated environmental challenges that are rarely assessed in an integrated quantitative framework. This study aims to quantitatively assess the potential of organic waste and industrial waste heat as circular economy resources in Indramayu Regency, West Java, Indonesia. A structured secondary data analysis approach was applied, encompassing waste potential estimation from agricultural, livestock, and household sectors, alongside industrial waste heat estimation from Pertamina Refinery Unit VI Balongan. Results indicate that total usable organic waste potential reaches 2,449,876 tons/year, comprising agricultural residues (2,045,752 tons/year), livestock manure (156,435 tons/year), and household organic waste (247,689 tons/year). Recoverable waste heat is estimated at 1.44–3.3 million GJ/year, sufficient to support biomass drying and zeolite activation processes within an organic fertilizer production system. Integration of these resource streams is projected to avoid greenhouse gas emissions of 99,558–248,896 tons CO_2e/year under a moderate utilization scenario, while soil carbon sequestration potential reaches approximately 92,000 tons CO_2/year. These findings establish that Indramayu Regency possesses complementary and substantial resource endowments to support cross-sector circular economy development.

***Keywords*:** organic waste potential, industrial waste heat recovery, circular economy, greenhouse gas mitigation, soil carbon sequestration

Citation: Aritonang, R. F., Setiawan, I., dan Iskandar, J. (2026). Kajian Kuantitatif Potensi Limbah Organik dan Panas Sisa Industri sebagai Sumber Daya Ekonomi Sirkular di Kabupaten Indramayu. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1349-1363, doi:10.14710/jil.24.6.1349-1363

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim yang dipicu oleh emisi gas rumah kaca (GRK) anthropogenik menjadi salah satu tantangan keberlanjutan terbesar abad ke-21. Sektor energi dan pertanian secara bersama-sama menyumbang sekitar 34% emisi GRK global, dengan metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O) dari aktivitas pertanian berkontribusi secara tidak proporsional terhadap pemanasan global (Tubiello *et al*., 2021). Di sisi lain, pengelolaan limbah organik yang tidak optimal — mencakup residu pertanian, kotoran ternak, dan sampah organik rumah tangga — menghasilkan emisi tambahan yang signifikan melalui dekomposisi anaerobik tak terkontrol dan praktik pembakaran terbuka (Kaza *et al*., 2018). Tekanan ganda ini mendorong minat global terhadap kerangka ekonomi sirkular sebagai alternatif sistemik terhadap model pengelolaan sumber daya linier yang memperlakukan limbah sebagai beban lingkungan (Kirchherr *et al*., 2023).

Paradigma ekonomi sirkular menawarkan pendekatan transformatif dengan menekankan sirkulasi material dan energi secara terus-menerus dalam sistem *closed-loop*, sehingga meminimalkan timbulan limbah dan eksternalitas lingkungan (Geissdoerfer *et al*., 2020). Dalam kerangka ini, aliran limbah organik dikonseptualisasikan ulang sebagai bahan baku sekunder yang mampu mendukung *input* pertanian berkelanjutan, produksi bioenergi, dan restorasi tanah (Chojnacka *et al*., 2020). Secara paralel, panas sisa industri — didefinisikan sebagai energi termal residu yang dilepaskan dari proses industri tanpa pemanfaatan produktif lebih lanjut — merepresentasikan sumber daya energi yang belum dimanfaatkan secara signifikan di tingkat global. *International Energy Agency* memperkirakan bahwa 20–50% konsumsi energi industri hilang sebagai panas sisa, bergantung pada karakteristik industri dan kondisi efisiensi teknologi yang digunakan. Pemulihan dan pemanfaatan kembali energi termal ini dapat meningkatkan efisiensi energi industri secara keseluruhan sekaligus mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil tambahan (Forman *et al*., 2016).

Indonesia, sebagai salah satu produsen pertanian dan konsumen energi terbesar di Asia Tenggara, menghadapi urgensi khusus dalam mengatasi tantangan yang saling berkaitan ini. Pertanian Indonesia masih sangat bergantung pada pupuk anorganik, yang mengakibatkan peningkatan biaya produksi, degradasi kualitas tanah secara progresif, dan peningkatan emisi N_2O akibat kelebihan aplikasi nitrogen sintetis (Sariningsih *et al*., 2022). Di tingkat nasional, Indonesia menghasilkan sekitar 68,7 juta ton limbah organik per tahun, sebagian besar belum dimanfaatkan dan berkontribusi terhadap emisi metana dari tempat pembuangan akhir dan pembuangan terbuka (KLHK, 2023). Kondisi ini mengindikasikan kesenjangan kritis antara potensi sumber daya yang tersedia dan efisiensi pemanfaatan sumber daya aktual dalam sistem pertanian dan pengelolaan limbah Indonesia.

Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat, menyajikan konteks yang strategis untuk kajian potensi sumber daya ekonomi sirkular. Kabupaten ini merupakan salah satu sentra produksi padi terbesar di Jawa Barat, menghasilkan volume limbah pertanian, kotoran ternak, dan sampah organik rumah tangga yang sangat besar setiap tahunnya. Secara bersamaan, keberadaan Kilang Pertamina Refinery Unit (RU) VI Balongan — salah satu kilang minyak terbesar Indonesia dengan kapasitas pengolahan sekitar 125.000 barel per hari — menempatkan kabupaten ini sebagai lokasi dengan potensi pembangkitan panas sisa industri yang signifikan (KESDM, 2022). Ko-lokasi spasial antara aliran limbah organik bervolume tinggi dan energi termal industri berskala besar dalam satu sistem regional yang sama menciptakan peluang integrasi sumber daya lintas sektor yang belum pernah dikuantifikasi secara sistematis dalam literatur sebelumnya.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji potensi limbah organik (Scarlat *et al*., 2010), pemulihan panas sisa industri (Forman *et al*., 2016), serta implementasi ekonomi sirkular dalam konteks pertanian (Chojnacka *et al*., 2020) secara terpisah, kajian kuantitatif terpadu atas aliran sumber daya komplementer ini dalam satu sistem regional masih sangat terbatas, khususnya dalam konteks Indonesia. Studi-studi yang ada mengenai pengelolaan limbah organik di Indonesia sebagian besar berfokus pada sampah perkotaan atau penilaian biomassa sektor tunggal, tanpa mengintegrasikan potensi energi residu industri sebagai bagian dari *baseline* sumber daya ekonomi sirkular yang terpadu (Putri *et al*., 2022). Kesenjangan ini menghambat pengembangan kebijakan berbasis bukti untuk transisi ekonomi sirkular regional dan membatasi identifikasi sinergi sumber daya lintas sektor yang dapat secara simultan menjawab tantangan produktivitas pertanian, efisiensi energi, dan mitigasi GRK.

Oleh karena itu, penelitian ini diposisikan sebagai penyusunan *baseline* kuantitatif regional (*regional quantitative baseline*) atas potensi limbah organik dan panas sisa industri sebagai sumber daya ekonomi sirkular di Kabupaten Indramayu. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pemetaan awal dan kuantifikasi terstruktur potensi sumber daya — bukan pada pembuktian kelayakan implementasi yang memerlukan data empiris lapangan lebih lanjut. *Baseline* ini diharapkan dapat menjadi fondasi *evidens* bagi pengambil kebijakan, peneliti lanjutan, dan calon investor yang ingin mengembangkan sistem ekonomi sirkular berbasis sumber daya lokal di wilayah ini (Brunner & Rechberger, 2016). Secara spesifik, penelitian ini mengkuantifikasi ketersediaan limbah organik dari sektor pertanian, peternakan, dan rumah tangga; mengestimasi panas sisa yang dapat dipulihkan secara teknis dari Pertamina RU VI Balongan; menghitung potensi indikatif pengurangan emisi GRK dan kapasitas sekuestrasi karbon tanah;

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

serta menyajikan analisis kelayakan ekonomi konseptual sebagai bagian dari *baseline* perencanaan. Temuan penelitian ini berkontribusi pada pengembangan evidence base untuk transisi ekonomi sirkular regional dan mendukung pencapaian SDG 7, 12, dan 13 dalam konteks Indonesia (UN, 2015).

2. METODE PENELITIAN

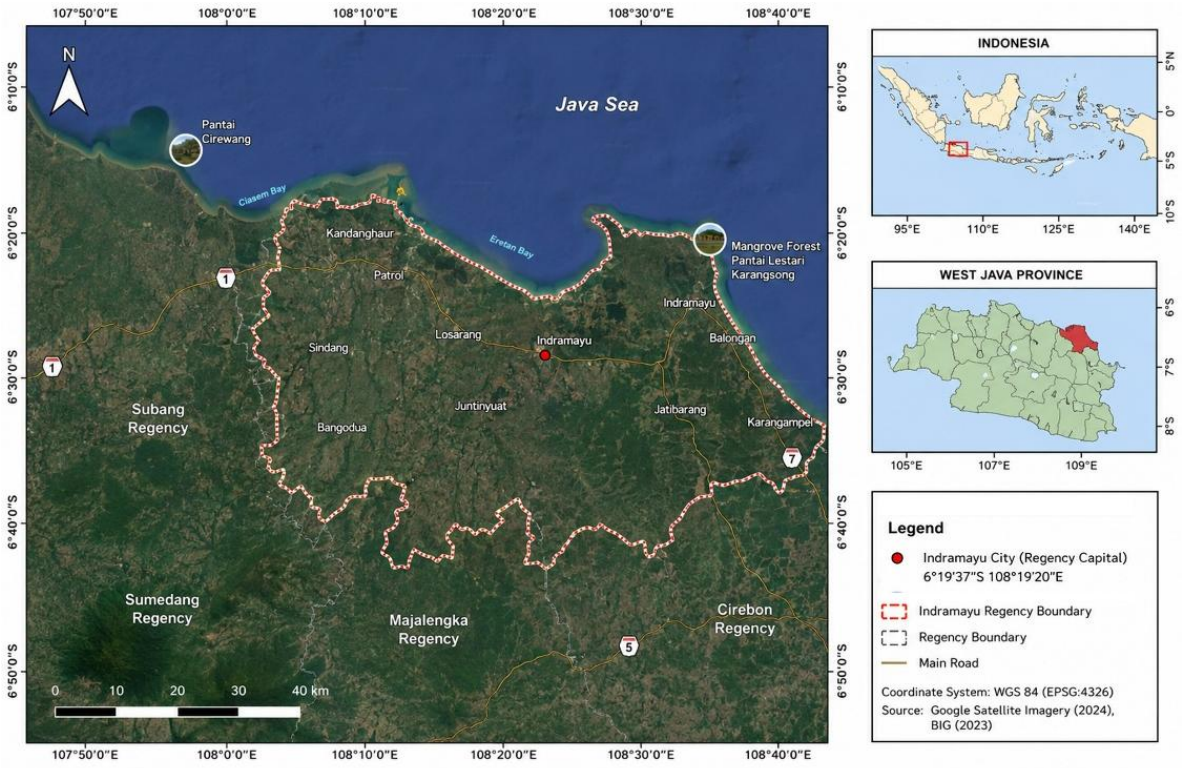
2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif berbasis analisis data sekunder, yang dirancang untuk mengkaji dan mengkuantifikasi potensi limbah organik dan panas sisa industri sebagai sumber daya dalam kerangka ekonomi sirkular di Kabupaten Indramayu. Pilihan desain ini didasarkan pada kesesuaiannya dengan tujuan penelitian yang bersifat estimatif dan *baseline-generating*, bukan eksperimental maupun inferensial (Creswell & Creswell, 2022). Penelitian dikategorikan sebagai ex-ante assessment, yakni pendekatan evaluatif yang mengkaji potensi dan implikasi suatu sistem sebelum implementasi nyata dilakukan, berdasarkan data sekunder dan parameter ilmiah yang tervalidasi (Bassi *et al*., 2021).

Kerangka analisis yang digunakan mengacu pada pendekatan resource flow assessment, yang secara sistematis mengkuantifikasi ketersediaan, keterulihan, dan potensi produktif aliran material dan energi dalam suatu sistem geografis yang terdefinisi (Brunner & Rechberger, 2016). Pendekatan ini banyak diterapkan dalam penelitian ekonomi sirkular untuk menetapkan *baseline* empiris bagi transisi waste-to-resource dan perencanaan simbiosis industri (Pomponi & Moncaster, 2017). Dalam penelitian ini, empat aliran sumber daya dikaji secara terintegrasi, yaitu: residu biomassa pertanian, kotoran ternak, sampah organik rumah tangga, dan panas sisa industri dari Kilang Pertamina RU VI Balongan. Keterpaduan keempat aliran tersebut menjadi benang merah yang menghubungkan seluruh tahapan analisis, dari kuantifikasi sumber daya hingga penilaian kelayakan ekonomi dan lingkungan.

2.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat, pada bulan Maret 2026. Pemilihan lokasi didasarkan pada dua karakteristik strategis yang menjadikannya unik secara ilmiah: pertama, dominasi sistem pertanian padi yang menghasilkan volume residu biomassa sangat besar; dan kedua, keberadaan Kilang Pertamina RU VI Balongan sebagai fasilitas industri energi berskala besar yang menghasilkan panas sisa dalam jumlah signifikan (KESDM, 2022). Ko-lokasi kedua karakteristik ini dalam satu batas administratif yang sama menciptakan peluang integrasi sumber daya lintas sektor yang jarang ditemukan di wilayah lain, dan menjadikan Kabupaten Indramayu sebagai konteks kasus yang representatif untuk kajian potensi ekonomi sirkular berbasis sumber daya lokal (Chertow & Park, 2020).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian, Kabupaten Indramayu
Sumber: Diolah Penulis (2026)

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Kabupaten Indramayu dipilih sebagai wilayah studi karena karakteristiknya yang strategis dalam mendukung integrasi sistem industri dan pertanian dalam kerangka ekonomi sirkular. Wilayah ini dikenal sebagai salah satu sentra produksi padi terbesar di Jawa Barat dan didominasi oleh aktivitas pertanian, khususnya budidaya padi sawah. Pada saat yang sama, keberadaan Kilang Pertamina RU VI Balongan menyediakan potensi panas buang industri yang signifikan, yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi termal alternatif untuk proses aktivasi zeolit dan pengeringan biomassa dalam sistem produksi POC–Zeolit yang diusulkan.

Selain keunggulan pertanian dan industrinya, Kabupaten Indramayu juga memiliki sumber daya limbah organik yang melimpah, berasal dari residu pertanian, kegiatan peternakan, dan limbah organik rumah tangga. Karakteristik inilah yang menjadikan kabupaten ini sangat relevan untuk pengembangan model ekonomi sirkular lintas sektor yang mengintegrasikan pemulihan material, pemanfaatan energi industri, pertanian berkelanjutan, dan strategi mitigasi karbon.

2.3. Teknik Pengumpullan Data

Data dalam penelitian ini bersumber eksklusif dari data sekunder yang diperoleh melalui tiga kategori sumber: basis data pemerintah daerah, laporan institusi internasional, dan literatur ilmiah terverifikasi. Data produksi padi per kecamatan dan populasi ternak diperoleh dari Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Indramayu (2026), sementara data timbulan sampah organik rumah tangga bersumber dari Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Indramayu (2026). Parameter energi kilang mengacu pada publikasi International Energy Agency (IEA, 2022) dan U.S. Department of Energy (2008), sedangkan faktor emisi dan parameter karbon merujuk pada laporan IPCC (2021) dan literatur ilmiah terkait (Lal, 2020).

Meskipun penelitian ini secara dominan berbasis data sekunder, terdapat satu komponen data yang dikonfirmasi melalui pengumpulan data primer terbatas. Harga jual pupuk organik cair (POC) yang digunakan dalam analisis ekonomi sebesar Rp1.500 per liter ditetapkan berdasarkan konfirmasi melalui wawancara singkat dengan tujuh petani di wilayah penyangga Kilang RU VI Balongan yang dilakukan pada Maret 2026. Wawancara ini bukan merupakan metode utama penelitian, melainkan berfungsi sebagai triangulasi data pasar untuk memverifikasi kewajaran asumsi harga yang digunakan dalam model ekonomi (Yin, 2018). Petani informan menyatakan kesediaan membayar (*willingness to pay*) pada kisaran Rp1.200–1.800 per liter untuk produk pupuk organik yang telah terbukti efektivitasnya, sehingga asumsi harga Rp1.500 per liter berada pada nilai tengah rentang tersebut dan dapat dipertanggungjawabkan secara empiris. Data primer terbatas ini tidak mengubah karakter penelitian sebagai kajian berbasis data sekunder, melainkan memperkuat validitas asumsi ekonomi yang digunakan

Pemilihan sumber data mengikuti tiga kriteria: kredibilitas institusional, kompatibilitas metodologis dengan estimasi skala regional, dan kemutakhiran data dalam rentang sepuluh tahun terakhir. Seluruh data sekunder divalidasi silang antar sumber untuk menjamin konsistensi dan meminimalkan galat estimasi, sebagaimana lazim diterapkan dalam kajian sistem terintegrasi (Yin, 2018). Keterkaitan antara setiap sumber data, variabel yang dikaji, metode pengumpulan, dan teknik analisis disajikan secara lengkap pada Tabel 1.

Tabel 1. Sumber Data Sekunder dan Parameter yang Digunakan dalam Kajian Potensi Sumber Daya

No	Komponen Sumber Daya	Variabel	Sumber Data	Periode Data	Jenis Data
1	Limbah pertanian	Produksi padi per kecamatan; luas lahan sawah	Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Indramayu	2025–2026	Statistik pemerintah daerah
2	Limbah peternakan	Populasi ternak per jenis; koefisien produksi kotoran	Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Indramayu; IPCC (2006); FAO (2019)	2025–2026	Statistik daerah; standar internasional
3	Sampah organik rumah tangga	Timbulan sampah organik harian	Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Indramayu	2025–2026	Statistik pemerintah daerah
4	Panas sisa industri	Kapasitas kilang; intensitas energi; faktor keterulihan	IEA (2022); U.S. DOE (2008); Forman *et al*. (2016)	2022–2024	Laporan institusi internasional
5	Pengurangan emisi GRK	Faktor emisi; volume pengalihan limbah	IPCC (2021)	2021	Laporan ilmiah internasional
6	Sekuestrasi karbon tanah	Laju peningkatan SOC; luas lahan sawah	Lal (2020)	2020	Literatur ilmiah terverifikasi
7	Analisis ekonomi	Harga pasar POC; efisiensi konversi; parameter investasi	Bernal *et al*. (2017); data pasar	2024–2026	Literatur; survei pasar
8	Analisis ekonomi — harga pasar	Harga jual POC; willingness to pay petani	Wawancara terbatas dengan 7 petani di wilayah penyangga RU VI Balongan	Maret 2026	Data primer terbatas (triangulasi)

Sumber: Diolah Penulis (2026)

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

2.4. Prosedur Perhitungan

Seluruh estimasi potensi sumber daya dalam penelitian ini diturunkan melalui prosedur kalkulasi kuantitatif yang terstruktur menggunakan parameter dan metodologi yang telah tervalidasi secara internasional.

Estimasi limbah organik pertanian dihitung dengan mengalikan produksi gabah per kecamatan dengan faktor residu jerami sebesar 1,2 — nilai moderat dalam rentang straw-to-grain ratio yang umum diterima antara 1,0–1,5 ton jerami per ton gabah (Scarlat *et al*., 2010). Estimasi limbah peternakan diperoleh dengan menerapkan koefisien produksi kotoran per jenis ternak yang bersumber dari standar internasional IPCC (2006) dan FAO (2019), dilanjutkan dengan penerapan faktor kolektabilitas dan efisiensi proses untuk memperoleh estimasi biomassa yang realistis untuk dimanfaatkan. Potensi sampah organik rumah tangga diambil langsung dari data karakterisasi sampah dinas terkait, konsisten dengan metodologi penilaian sampah padat yang direkomendasikan Kaza *et al*. (2018).

Potensi panas sisa industri diestimasi melalui prosedur kalkulasi energy flow bertahap. Energi input bruto dihitung dari kapasitas kilang (125.000 barel/hari) dan kandungan energi minyak mentah (6,1 GJ/barel). Konsumsi energi operasional diestimasi dengan menerapkan faktor intensitas energi kilang sebesar 6–8% dari energi input bruto (IEA, 2022). Panas sisa dihitung sebesar 20–50% dari energi operasional, sesuai rentang kehilangan energi industri yang dilaporkan dalam literatur (Forman *et al*., 2016), kemudian dikalikan dengan faktor keterulihan (recoverability factor) sebesar 30–50% untuk menghasilkan estimasi panas sisa yang dapat dipulihkan secara teknis (Miró *et al*., 2021).

Estimasi pengurangan emisi GRK dihitung dengan menerapkan faktor emisi IPCC (2021) sebesar 0,2–0,5 ton CO_2e per ton limbah yang diolah terhadap volume pengalihan limbah yang diproyeksikan dalam tiga skenario pemanfaatan: pesimis (10%), moderat (20%), dan optimis (40%). Pendekatan skenario ini mencerminkan ketidakpastian implementasi dan konsisten dengan praktik penilaian mitigasi GRK dalam studi ekonomi sirkular (Tisserant *et al*., 2020). Potensi sekuestrasi karbon tanah diestimasi dengan mengalikan luas lahan sawah (126.076 ha) dengan laju peningkatan *soil organic carbon* (SOC) sebesar 0,2 ton C/ha/tahun yang diturunkan dari literatur aplikasi pupuk organik pada sistem padi tropis (Lal, 2020), kemudian dikonversi ke CO_2 ekuivalen menggunakan faktor konversi standar 3,67 ton CO_2 per ton C.

Kelayakan ekonomi dinilai melalui proyeksi pendapatan, estimasi biaya operasional, perhitungan *Net Present Value* (NPV) pada tingkat diskonto 10% selama 10 tahun, dan analisis periode pengembalian investasi (payback period). Seluruh asumsi dan parameter didokumentasikan secara transparan dalam Lampiran 3 untuk memungkinkan replikasi dan kalibrasi di masa mendatang (Huysman *et al*., 2017). Ringkasan seluruh parameter perhitungan dan sumbernya disajikan pada Tabel 2.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Potensi Limbah Organik Sebagai Sumber Daya Ekonomi Sirkular

Kabupaten Indramayu menghasilkan volume limbah organik yang sangat besar dari tiga sektor utama: pertanian, peternakan, dan rumah tangga. Dalam kerangka ekonomi sirkular, ketiga aliran limbah ini tidak dipandang sebagai residu yang harus dibuang, melainkan sebagai sumber daya sekunder yang dapat dikonversi menjadi input produktif melalui sistem pengelolaan yang terstruktur (Kirchherr *et al*., 2023). Karakteristik komplementer dari ketiga jenis limbah tersebut, yakni tingginya kandungan karbon pada jerami padi, kandungan nitrogen pada kotoran ternak, dan sifat mudah terurai pada sampah organik rumah tangga dimana hal ini menciptakan komposisi substrat yang ideal untuk produksi pupuk organik berbasis fermentasi (Chojnacka *et al*., 2020).

Tabel 2. Ringkasan Parameter Perhitungan dan Sumber Acuan

No	Komponen	Formula	Parameter Kunci	Nilai	Sumber
1	Limbah pertanian	Produksi × Faktor residu	*Straw-to-grain ratio*	1,2	Scarlat *et al.* (2010)
2	Limbah peternakan	Populasi × Koefisien × Faktor penyesuaian	Koefisien produksi kotoran	Spesifik per jenis ternak	IPCC (2006); FAO (2019)
3	Sampah organik rumah tangga	Timbulan harian × 365	Fraksi organik	60% dari total sampah	Kaza *et al.* (2018)
4	Panas sisa bruto	Kapasitas × Kandungan energi × Intensitas	Faktor intensitas energi kilang	6–8%	IEA (2022)
5	Panas sisa terpulihkan	Panas sisa bruto × Proporsi × Keterulihan	*Recoverability factor*	30–50%	Forman *et al.* (2016); Miró *et al.* (2021)
6	Pengurangan emisi GRK	Limbah dialihkan × Faktor emisi	Faktor emisi limbah	0,2–0,5 ton CO_2e/ton	IPCC (2021)
7	Sekuestrasi karbon tanah	Luas lahan × Laju SOC × 3,67	Laju peningkatan SOC	0,2 ton C/ha/tahun	Lal (2020)
8	Pendapatan	Volume output × Harga jual	Efisiensi konversi	40%	Bernal *et al.* (2017)
9	NPV	Σ CFt/(1+r)^t – I_0	Tingkat diskonto	10%	Huysman *et al.* (2017)

Sumber: Diolah Penulis (2026)

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

3.1.1. Limbah Pertanian

Sektor pertanian merupakan kontributor terbesar biomassa organik di Kabupaten Indramayu. Berdasarkan data produksi dari Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Indramayu (2026), total produksi gabah kering panen (GKP) seluruh wilayah mencapai 1.704.793 ton dari lahan sawah seluas 126.076 hektar yang tersebar di 31 kecamatan. Dengan menerapkan faktor residu jerami sebesar 1,2 yaitu nilai moderat dalam rentang *straw-to-grain ratio* yang umum diterima antara 1,0–1,5 ton jerami per ton gabah (Scarlat *et al*., 2010) dimana potensi limbah jerami padi di Kabupaten Indramayu diestimasi sebesar 2.045.752 ton per tahun.

Distribusi spasial potensi limbah pertanian tidak merata antar kecamatan, mencerminkan variasi intensitas pertanian padi di wilayah tersebut. Lima kecamatan dengan kontribusi tertinggi adalah Gantar, Terisi, Kroya, Anjatan, dan Cikedung, yang secara bersama-sama menyumbang sekitar 31% dari total potensi limbah pertanian kabupaten (Tabel 3). Konsentrasi spasial ini memiliki implikasi strategis terhadap perencanaan lokasi fasilitas pengolahan limbah, di mana penempatan unit produksi di klaster kecamatan berpotensi tinggi dapat menekan biaya logistik pengumpulan bahan baku secara signifikan (Tisserant *et al*., 2020).

Secara karakteristik, jerami padi memiliki kandungan lignoselulosa tinggi dan rasio C/N yang besar sehingga berfungsi sebagai sumber karbon utama dalam proses fermentasi pupuk organik. Namun kondisi aktual di lapangan menunjukkan bahwa pemanfaatan jerami masih sangat terbatas. Praktik pembakaran jerami setelah panen masih dominan dilakukan petani dengan alasan efisiensi waktu persiapan lahan. Praktik ini tidak hanya menyebabkan hilangnya nilai biomassa yang signifikan, tetapi juga menghasilkan emisi CO_2 dan partikulat yang berdampak buruk terhadap kualitas udara dan lingkungan. Kondisi ini mengonfirmasi keberadaan hidden value yang selama ini terbuang akibat ketiadaan ekosistem pengelolaan biomassa yang terstruktur di tingkat petani.

3.1.2. Limbah Peternakan

Sektor peternakan Kabupaten Indramayu mencakup 12 jenis ternak dengan total populasi 12.221.693 ekor, didominasi oleh unggas seperti ayam pedaging, itik, dan ayam buras. Estimasi potensi kotor limbah peternakan dihitung menggunakan koefisien produksi kotoran per jenis ternak yang bersumber dari standar internasional IPCC (2006) dan FAO (2019), menghasilkan potensi bruto sebesar 577.580 ton per tahun.

Namun tidak seluruh potensi bruto tersebut dapat langsung dimanfaatkan dalam sistem produksi. Pendekatan realistis diterapkan melalui tiga tahapan penyaringan yang berjenjang. Pertama, penerapan suitability factor untuk merefleksikan kualitas dan kesesuaian bahan baku, menghasilkan limbah layak sekitar 325.907 ton per tahun. Kedua, penerapan collectability factor sebesar 60% yang mencerminkan keterbatasan pengumpulan secara praktis di lapangan, menghasilkan 195.544 ton per tahun sebagai angka yang dapat dikumpulkan secara realistis. Ketiga, penerapan efisiensi proses sebesar 80%, sehingga diperoleh usable biomass sebesar 156.435 ton per tahun yaitu hanya sekitar 27% dari potensi bruto awal. Pendekatan konservatif ini penting untuk menghindari overestimasi kapasitas sistem yang umum terjadi dalam kajian potensi biomassa tingkat wilayah (Scarlat *et al*., 2010).

Kotoran sapi dan kambing merupakan sumber nitrogen dan unsur hara esensial yang paling relevan dalam sistem produksi pupuk organik. Kondisi aktual di lapangan menunjukkan bahwa sebagian besar kotoran ternak dibiarkan menumpuk tanpa pengolahan yang memadai, atau digunakan langsung sebagai pupuk kandang tanpa proses stabilisasi terlebih dahulu sehingga nilai nutrisinya tidak optimal. Padahal pengelolaan kotoran ternak yang tidak terstruktur berkontribusi terhadap emisi amonia (NH_3) yang berdampak pada eutrofikasi dan penurunan kualitas udara lokal (Aguirre-Villegas *et al*., 2024). Temuan ini menegaskan bahwa intervensi sistem pengumpulan limbah peternakan yang terorganisir merupakan komponen kritis dalam menjamin kontinuitas bahan baku nitrogen dalam model yang dikembangkan.

3.1.3. Sampah Organik Rumah Tangga

Berdasarkan data Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Indramayu (2026), timbulan sampah harian mencapai 1.131.000 kg per hari, dengan fraksi organik sebesar 678.600 kg per hari atau setara 60% dari total timbulan sampah. Secara tahunan, potensi sampah organik rumah tangga yang dapat dimanfaatkan mencapai 247.689 ton per tahun.

Tabel 3. Lima Kecamatan dengan Potensi Limbah Pertanian Tertinggi di Kabupaten Indramayu

No	Kecamatan	Luas Lahan (ha)	Produksi GKP (ton)	Potensi Jerami (ton/tahun)	Proporsi (%)
1	Gantar	10.087,90	146.409,98	175.692,00	8,59
2	Terisi	9.111,60	110.983,81	133.180,60	6,51
3	Kroya	10.787,30	88.615,04	106.338,00	5,2
4	Anjatan	6.707,00	80.861,36	97.033,60	4,74
5	Cikedung	4.956,30	92.070,91	110.485,10	5,4
—	26 Kecamatan lainnya	84.425,90	1.085.852,25	1.423.022,70	69,56
	Total	**126.076,10**	**1.704.793,35**	**2.045.752,00**	**100**

Sumber: Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Indramayu (2026); diolah penulis

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Sampah organik rumah tangga yang didominasi sisa makanan memiliki rasio C/N yang relatif seimbang dan bersifat mudah terurai, sehingga berperan penting sebagai aktivator mikrobial yang mempercepat proses fermentasi dalam produksi pupuk organik cair (Kaza *et al*., 2018). Karakteristik ini menjadikannya komponen yang sangat komplementer terhadap jerami padi yang memiliki rasio C/N tinggi dan laju dekomposisi lambat. Namun sistem pengelolaan sampah yang berjalan saat ini masih bersifat disposal-oriented, dengan tingkat pemilahan di sumber yang masih sangat rendah. Kondisi ini mencerminkan gap antara potensi sumber daya yang tersedia dan kemampuan sistem dalam menginternalisasi limbah sebagai input produktif — sebuah permasalahan sistemik yang jamak ditemukan pada kabupaten-kabupaten berpendapatan menengah di Indonesia (Putri *et al*., 2022).

3.1.4. Sintesis Potensi Limbah Organik Terintegrasi

Secara keseluruhan, total potensi limbah organik yang dapat dimanfaatkan dari tiga sektor di Kabupaten Indramayu mencapai 2.449.876 ton per tahun (Tabel 4). Angka ini merepresentasikan basis material yang sangat signifikan untuk mendukung sistem produksi pupuk organik skala besar dalam kerangka ekonomi sirkular. Ketiga aliran limbah tersebut saling melengkapi secara teknis: jerami padi menyediakan fraksi karbon yang kaya lignoselulosa, kotoran ternak menyumbang nitrogen dan unsur hara esensial, sementara sampah organik rumah tangga menyediakan substrat yang mudah terurai untuk mengaktifkan proses fermentasi. Keterpaduan karakteristik substrat ini sesuai dengan prinsip circular bioeconomy yang menekankan optimalisasi pemanfaatan aliran biomassa secara simultan untuk menghasilkan nilai ekonomi sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan.

Perbedaan pendekatan dalam penerapan faktor penyaringan antara ketiga jenis limbah organik didasarkan pada karakteristik fisik, kondisi pengelolaan aktual, dan keterbatasan logistik yang berbeda secara fundamental untuk setiap jenis limbah. Untuk limbah pertanian (jerami padi), faktor penyaringan tidak diterapkan karena jerami tersedia dalam kondisi terkonsentrasi di lahan sawah segera setelah panen, dapat dikumpulkan secara mekanis menggunakan peralatan pemanen yang sudah ada, dan seluruh volume yang dihasilkan secara teknis layak digunakan sebagai substrat fermentasi tanpa seleksi kualitas yang ketat. Kondisi ini konsisten dengan pendekatan yang digunakan dalam kajian potensi residu pertanian skala regional di mana seluruh volume produksi diakui sebagai potensi tersedia (Scarlat *et al*., 2010). Untuk sampah organik rumah tangga, faktor penyaringan juga tidak diterapkan karena angka 247.689 ton per tahun yang digunakan sudah merupakan fraksi organik murni dari total timbulan sampah — bukan angka kotor — sebagaimana ditetapkan dalam data karakterisasi sampah Dinas Lingkungan Hidup (2026) yang sudah memisahkan fraksi organik dari anorganik dan B3. Dengan demikian, angka tersebut sudah merepresentasikan potensi yang realistis untuk dimanfaatkan tanpa koreksi lebih lanjut (Kaza *et al*., 2018).

Sebaliknya, untuk limbah peternakan, penerapan faktor penyaringan tiga tahap (suitability, collectability, dan efisiensi proses) dilakukan karena tiga alasan yang berbeda secara kualitatif. Pertama, kotoran ternak — khususnya dari unggas yang mendominasi populasi ternak di Kabupaten Indramayu — memiliki variasi kualitas yang tinggi tergantung pada sistem kandang, kadar air, dan campuran dengan bahan lain, sehingga tidak seluruh volume kotor dapat langsung diproses tanpa seleksi (IPCC, 2006). Kedua, ternak tersebar di lokasi yang sangat terdesentralisasi dengan skala usaha kecil-menengah sehingga kolektabilitas praktisnya jauh lebih rendah dibandingkan jerami yang dipanen secara terpusat di lahan sawah (FAO, 2019). Ketiga, kandungan air yang tinggi pada kotoran segar menyebabkan susut bobot yang signifikan selama proses awal pengolahan, sehingga faktor efisiensi proses perlu diperhitungkan untuk memperoleh estimasi output yang realistis (Bernal *et al*., 2017). Pendekatan diferensiasi faktor penyaringan berdasarkan karakteristik spesifik setiap jenis limbah ini sejalan dengan praktik terbaik dalam kajian potensi biomassa regional yang menekankan pentingnya mempertimbangkan technical, geographical, dan economic potential secara bertingkat (Scarlat *et al*., 2010).

3.2. Potensi Panas Sisa Industri yang Dapat Dipulihkan

Panas sisa industri (industrial waste heat) didefinisikan sebagai energi termal residu yang dilepaskan dari proses industri ke lingkungan tanpa pemanfaatan produktif lebih lanjut, baik melalui gas buang, sistem pendingin, maupun radiasi termal (Forman *et al*., 2016). Dalam konteks ekonomi sirkular, panas sisa merepresentasikan sumber daya energi sekunder yang selama ini terbuang dan berpotensi diintegrasikan ke dalam sistem produksi lintas sektor sebagai pengganti energi fosil tambahan (Miró *et al*., 2021). Kilang Pertamina Refinery Unit (RU) VI Balongan, sebagai fasilitas pengolahan minyak bumi berskala besar yang beroperasi di Kabupaten Indramayu, merupakan sumber panas sisa industri yang signifikan dan strategis untuk dikaji potensi pemulihannya.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 4. Ringkasan Potensi Limbah Organik per Sektor di Kabupaten Indramayu

No	Sektor	Sumber	Potensi Bruto (ton/tahun)	Potensi Termanfaatkan (ton/tahun)	Fungsi dalam Sistem
1	Pertanian	Jerami padi	2.045.752	2.045.752	Sumber karbon
2	Peternakan	Kotoran ternak	577.580	156.435	Sumber nitrogen
3	Rumah tangga	Sisa makanan	247.689	247.689	Substrat fermentasi
	Total		**2.871.021**	**2.449.876**	

Sumber: Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian & Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Indramayu (2026); diolah penulis

Tabel 5. Parameter dan Hasil Kalkulasi Potensi Panas Sisa Industri RU VI Balongan

No	Tahap Kalkulasi	Parameter	Nilai	Satuan	Sumber
1	Kapasitas kilang	Throughput harian	125.000	barel/hari	KESDM (2022)
2	Kandungan energi	Energi per barel minyak	6,1	GJ/barel	IEA (2022)
3	Energi bruto	125.000 × 6,1 × 365	±278 juta	GJ/tahun	Kalkulasi
4	Intensitas energi kilang	% dari energi bruto	6–8	%	IEA (2022)
5	Energi operasional	Energi bruto × intensitas	16–22 juta	GJ/tahun	Kalkulasi
6	Proporsi panas sisa	% dari energi operasional	30	%	Forman *et al*. (2016)
7	Total panas sisa	Energi operasional × 30%	4,8–6,6 juta	GJ/tahun	Kalkulasi
8	Konversi satuan	1 GJ = 277,8 kWh	1.333–1.834	GWh/tahun	Standar fisika
9	*Recoverability factor*	% dari total panas sisa	30–50	%	Miró *et al*. (2021)
10	Panas sisa terpulihkan	Total × recoverability	1,44–3,3 juta	GJ/tahun	Kalkulasi final
11	Rentang temperatur	Medium-grade heat	150–400	°C	U.S. DOE (2008)

Sumber: Diolah penulis berdasarkan IEA (2022), Forman et al. (2016), Miró et al. (2021), U.S. DOE (2008)

3.2.1. Prosedur Kalkulasi *Energy Flow* Bertahap

Estimasi potensi panas sisa dilakukan melalui pendekatan kalkulasi energy flow bertahap yang transparan dan dapat direplikasi, mengikuti metodologi yang telah tervalidasi dalam literatur pemulihan panas sisa industri (Forman *et al*., 2016; Miró *et al*., 2021). Setiap tahap kalkulasi beserta parameter dan sumbernya disajikan secara eksplisit pada Tabel 5.

Tahap 1 — Energi Input Bruto. Kilang RU VI Balongan beroperasi dengan kapasitas pengolahan sekitar 125.000 barel minyak mentah per hari (KESDM, 2022). Dengan menggunakan kandungan energi minyak mentah sebesar 6,1 GJ per barel sebagai nilai standar yang diterima secara internasional (IEA, 2022), total energi bruto yang diproses dalam sistem kilang mencapai sekitar 278 juta GJ per tahun (125.000 barel/hari × 6,1 GJ/barel × 365 hari).

Tahap 2 — Energi Operasional Kilang. Tidak seluruh energi bruto tersebut dikonsumsi sebagai energi operasional kilang. Berdasarkan faktor intensitas energi kilang minyak sebesar 6–8% dari energi input bruto — rentang yang ditetapkan IEA (2022) sebagai standar konsumsi energi kilang global — energi operasional kilang diestimasi pada kisaran 16–22 juta GJ per tahun. Pendekatan konservatif dengan batas bawah 6% dipilih untuk menghindari overestimasi, konsisten dengan praktik kalkulasi panas sisa industri dalam studi pemulihan energi (Zhang *et al*., 2021).

Tahap 3 — Total Panas Sisa yang Dihasilkan. Dari total energi operasional kilang, sekitar 20–50% dilepaskan ke lingkungan sebagai panas sisa — rentang yang dilaporkan konsisten dalam literatur efisiensi energi industri berat (IEA, 2022; Forman *et al*., 2016). Dengan menggunakan nilai tengah proporsi panas sisa sebesar 30% dari energi operasional, total panas sisa yang dihasilkan kilang RU VI Balongan diestimasi pada kisaran 4,8–6,6 juta GJ per tahun, atau setara dengan 1.333–1.834 GWh per tahun setelah konversi menggunakan faktor standar 1 GJ = 277,8 kWh.

Tahap 4 — Panas Sisa yang Dapat Dipulihkan Secara Teknis. Tidak seluruh panas sisa dapat dipulihkan dan dimanfaatkan secara langsung karena adanya keterbatasan teknologi penukar panas, variasi temperatur aliran panas, dan faktor jarak distribusi. Berdasarkan recoverability factor sebesar 30–50% yang ditetapkan IEA (2014) dan dikonfirmasi oleh Miró *et al*. (2021) untuk kondisi industri kilang minyak, potensi panas sisa yang dapat dipulihkan secara teknis diestimasi pada kisaran 1,44–3,3 juta GJ per tahun. Angka ini merupakan nilai yang realistis dan konservatif untuk digunakan sebagai dasar perencanaan sistem pemanfaatan energi lintas sektor.

3.2.2. Kesesuaian Termal dengan Kebutuhan Proses

Panas sisa dari kilang minyak umumnya berada pada rentang temperatur 150–400°C, yang termasuk dalam kategori medium-grade heat (U.S. DOE, 2008). Rentang temperatur ini memiliki kesesuaian teknis yang tinggi dengan kebutuhan proses dalam sistem produksi pupuk organik yang dikembangkan. Pertama, proses pengeringan biomassa membutuhkan energi termal pada kisaran suhu 100–200°C dengan kebutuhan energi sekitar 1–2 GJ per ton bahan basah (FAO, 2017) rentang yang sepenuhnya tercakup oleh profil termal panas sisa kilang. Kedua, proses aktivasi termal zeolit membutuhkan pemanasan pada suhu 200–400°C dengan kebutuhan energi 1–3 GJ per ton zeolit tergantung kadar air awal dan jenis zeolit (Inglezakis & Zorpas, 2012) — rentang yang juga kompatibel dengan karakteristik panas sisa medium-grade dari kilang RU VI Balongan. Ketiga, pengendalian suhu optimal fermentasi pupuk organik pada kisaran 30–60°C dapat dipenuhi menggunakan aliran panas sisa bertemperatur lebih rendah yang diturunkan melalui sistem heat exchanger, sehingga seluruh profil termal panas sisa dapat dimanfaatkan

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

secara bertingkat sesuai kebutuhan proses (Zhang *et al*., 2021).

Kesesuaian termal ini merupakan salah satu keunggulan spesifik model yang dikembangkan. Berbeda dengan sumber energi terbarukan seperti biomassa atau energi surya yang memerlukan konversi energi bertingkat sebelum dapat digunakan dalam aplikasi suhu menengah, panas sisa medium-grade dari kilang dapat langsung diaplikasikan pada proses pengeringan dan aktivasi tanpa konversi tambahan yang mengakibatkan kehilangan energi. Hal ini meningkatkan overall energy efficiency sistem secara keseluruhan sekaligus menekan biaya operasional produksi (Miró *et al*., 2021).

3.2.3. Kapasitas Pengolahan yang Dimungkinkan

Dengan potensi panas sisa terpulihkan sebesar 1,44–3,3 juta GJ per tahun dan kebutuhan energi pengeringan biomassa sebesar 1–2 GJ per ton, kapasitas pengolahan biomassa yang secara teknis dimungkinkan oleh sistem panas sisa kilang RU VI Balongan mencapai 720.000 hingga 3,3 juta ton biomassa per tahun. Angka ini jauh melampaui total potensi usable biomass yang tersedia di Kabupaten Indramayu sebesar 2,45 juta ton per tahun, yang berarti ketersediaan energi bukan merupakan faktor pembatas dalam sistem. Faktor pembatas aktual justru terletak pada kapasitas pengumpulan limbah organik, infrastruktur logistik, dan kesiapan kelembagaan lintas sektor (Forman *et al*., 2016).

Untuk kapasitas aktivasi zeolit, dengan kebutuhan energi 1–3 GJ per ton, potensi panas sisa terpulihkan mampu mendukung aktivasi 480.000 hingga 3,3 juta ton zeolit per tahun — kapasitas yang sangat memadai untuk kebutuhan sistem produksi pupuk organik dalam skala kabupaten bahkan regional. Kapasitas energi yang besar ini membuka peluang pengembangan sistem dalam skala yang lebih luas seiring dengan peningkatan kapasitas pengumpulan limbah organik dari waktu ke waktu.

Dari perspektif ekonomi, pemanfaatan panas sisa sebagai pengganti energi eksternal berbasis fosil berpotensi menekan biaya energi produksi secara signifikan. Dalam proses industri konvensional, komponen energi dapat menyumbang hingga 30–40% dari total biaya produksi material (IEA, 2022). Substitusi energi melalui panas sisa industri yang pada dasarnya merupakan energi residu tanpa biaya bahan bakar tambahan dapat meningkatkan daya saing ekonomi produk sekaligus memperbaiki profil lingkungan sistem secara keseluruhan (Zhang *et al*., 2021).

Secara konseptual, integrasi panas sisa industri ke dalam sistem produksi pertanian mencerminkan implementasi konkret dari prinsip industrial symbiosis, di mana residu energi dari satu sektor menjadi input produktif bagi sektor lain dalam jaringan pertukaran sumber daya yang saling menguntungkan (Chertow & Park, 2020). Dalam konteks Kabupaten Indramayu, ko-lokasi spasial antara kilang RU VI Balongan dan kawasan pertanian padi yang luas menciptakan prasyarat geografis yang mendukung implementasi simbiosis industri ini — sebuah kondisi yang relatif langka dan menjadi keunggulan komparatif wilayah yang tidak banyak dimiliki kabupaten lain di Indonesia.

3.3. Potensi Pengurangan Gas Rumah Kaca dan Sekuestrasi Karbon

Pengelolaan limbah organik yang tidak terstruktur merupakan salah satu sumber emisi gas rumah kaca (GRK) yang kerap luput dari perhatian kebijakan. Dekomposisi anaerob limbah organik yang tidak terkontrol menghasilkan metana (CH_4) dalam jumlah signifikan, sementara praktik pembakaran terbuka jerami padi melepaskan CO_2 dan partikulat secara langsung ke atmosfer. Metana memiliki potensi pemanasan global sekitar 27–30 kali lebih besar dibandingkan CO_2 dalam rentang 100 tahun, sehingga pengalihan limbah organik pada sistem pengolahan terkontrol memberikan dampak mitigasi iklim yang tidak proporsional terhadap volumenya (IPCC, 2021). Di sisi lain, aplikasi pupuk organik secara konsisten pada lahan pertanian terbukti meningkatkan kandungan bahan organik tanah, yang berimplikasi langsung pada peningkatan kapasitas lahan sebagai penyerap karbon jangka panjang (Lal, 2020). Dua mekanisme mitigasi ini yaitu pengurangan emisi dari pengalihan limbah dan peningkatan sekuestrasi karbon tanah yang menjadi dimensi lingkungan utama yang dikuantifikasi dalam sub-bab ini.

3.3.1. Estimasi Pengurangan Emisi GRK Berdasarkan Skenario Pemanfaatan

Potensi pengurangan emisi GRK dihitung berdasarkan volume limbah organik yang dialihkan dari jalur pembuangan tidak terkontrol ke dalam sistem pengolahan terstruktur, dikalikan dengan faktor emisi yang ditetapkan IPCC (2021) sebesar 0,2–0,5 ton CO_2e per ton limbah organik. Rentang faktor emisi ini mencerminkan variasi kondisi pengelolaan limbah — nilai bawah 0,2 ton CO_2e/ton berlaku untuk limbah dengan penanganan semi-terkontrol, sedangkan nilai atas 0,5 ton CO_2e/ton mencerminkan kondisi pembuangan terbuka tanpa pengelolaan sama sekali yang umum dijumpai di wilayah pedesaan Indonesia (Wiedmann & Minx, 2008).

Mengingat implementasi sistem pemanfaatan limbah organik skala kabupaten tidak dapat langsung mencapai kapasitas penuh, analisis dilakukan dalam tiga skenario yang mencerminkan tingkat kematangan implementasi yang berbeda. Skenario pesimis (10%) merepresentasikan fase awal implementasi dengan infrastruktur terbatas dan partisipasi komunitas yang masih rendah. Skenario moderat (20%) mencerminkan kondisi implementasi yang realistis pada fase pengembangan sistem dengan dukungan kelembagaan yang memadai. Skenario optimis (40%) menggambarkan kondisi sistem yang telah berkembang dengan jaringan pengumpulan yang luas dan partisipasi multi-sektor yang kuat (Tisserant *et al*., 2020).

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 6. Estimasi Pengurangan Emisi GRK Berdasarkan Skenario Pemanfaatan Limbah Organik

Skenario	Tingkat Pemanfaatan	Limbah Diolah (ton/tahun)	Emisi Dihindari (ton CO_2e/tahun)	Keterangan
Pesimis	10%	244.988	48.998 – 122.494	Fase awal, infrastruktur terbatas
Moderat	20%	489.975	97.995 – 244.988	Implementasi realistis
Optimis	40%	979.950	195.990 – 489.975	Sistem berkembang penuh

Basis perhitungan: Total usable biomass 2.449.876 ton/tahun; faktor emisi 0,2–0,5 ton CO_2e/ton (IPCC, 2021)
Sumber: Diolah penulis (2026)

Pada skenario moderat yang paling relevan untuk perencanaan jangka menengah, sistem berpotensi menghindari emisi sebesar 97.995–244.988 ton CO_2e per tahun. Untuk memberikan konteks terhadap angka ini, emisi yang dihindari pada skenario moderat setara dengan mengeliminasi emisi dari sekitar 21.000–53.000 kendaraan bermotor dalam satu tahun beroperasi, menggunakan faktor konversi standar emisi kendaraan (IPCC, 2021). Angka ini menunjukkan bahwa meskipun bersifat lokal, potensi mitigasi sistem ini memiliki skala yang tidak dapat diabaikan dalam kontribusi terhadap target penurunan emisi nasional.

Selain emisi dari pengolahan limbah, pengurangan praktik pembakaran terbuka jerami padi juga memberikan kontribusi mitigasi tersendiri yang tidak tercakup dalam kalkulasi di atas. Pembakaran satu ton jerami padi melepaskan sekitar 1,5 kg CH_4, 0,07 kg N_2O, dan sejumlah besar CO_2 dan partikulat karbon hitam (Singh *et al*., 2021). Dengan potensi jerami yang dapat dialihkan dari pembakaran mencapai ratusan ribu ton per tahun bahkan pada skenario pesimis, pengurangan pembakaran jerami berpotensi memberikan co-benefit mitigasi iklim yang signifikan di luar kalkulasi utama, sekaligus meningkatkan kualitas udara lokal yang selama ini terdampak musim panen.

3.3.2. Potensi Sekuestrasi Karbon Tanah

Estimasi sekuestrasi karbon tanah dalam penelitian ini dihitung menggunakan seluruh luas lahan sawah Kabupaten Indramayu sebesar 126.076 hektar sebagai potensi maksimum teoritis (theoretical maximum potential), bukan sebagai proyeksi implementasi langsung yang terkait dengan skenario pemanfaatan limbah. Pendekatan ini dipilih untuk memberikan gambaran batas atas kapasitas sekuestrasi wilayah apabila seluruh lahan sawah mendapat aplikasi pupuk organik secara konsisten — sebuah kondisi jangka panjang yang dapat dicapai secara bertahap seiring dengan peningkatan skala produksi POC (Smith *et al*., 2020).

Untuk memperjelas hubungan antara volume pupuk yang tersedia dan luas lahan yang dapat dilayani, perlu dicatat bahwa output POC pada skenario moderat sebesar 195.990 ton per tahun — dengan asumsi dosis aplikasi standar 2–4 ton per hektar per musim tanam sebagaimana direkomendasikan dalam praktik pemupukan organik padi di Indonesia (Bernal *et al*., 2017) — secara teoritis mampu melayani antara 48.998 hingga 97.995 hektar lahan sawah per musim, atau setara dengan 39–78% dari total luas lahan sawah kabupaten. Dengan kata lain, bahkan pada skenario moderat, sistem ini sudah mampu memberikan cakupan aplikasi pupuk organik yang signifikan terhadap lahan pertanian di wilayah tersebut. Potensi sekuestrasi karbon yang dilaporkan sebesar 92.000 ton CO_2 per tahun merepresentasikan kondisi ideal apabila seluruh lahan sawah terlayani — sebuah target jangka panjang yang dapat dijadikan acuan perencanaan bertahap, bukan proyeksi jangka pendek yang langsung terkait dengan skenario pemanfaatan 20% limbah pada fase awal implementasi.

Berdasarkan laju peningkatan SOC sebesar 0,2 ton C per hektar per tahun yang dilaporkan untuk sistem pertanian padi tropis yang mendapat aplikasi pupuk organik secara teratur (Lal, 2020; Smith *et al*., 2020) dan luas lahan sawah di Kabupaten Indramayu sebesar 126.076 hektar, potensi sekuestrasi karbon tanah dihitung sebagai berikut:

Total C tersekuestrasi = 126.076 ha × 0,2 ton C/ha/tahun = 25.215 ton C/tahun

Setelah dikonversi menggunakan faktor standar 3,67 ton CO_2 per ton C (berdasarkan rasio massa molekul CO_2 terhadap C sebesar 44/12):

Total CO_2 ekuivalen = 25.215 ton C × 3,67 = ±92.000 ton CO_2/tahun

Angka ini menunjukkan bahwa seluruh lahan sawah di Kabupaten Indramayu berpotensi menjadi carbon sink sebesar sekitar 92.000 ton CO_2 per tahun apabila sistem aplikasi pupuk organik berbasis limbah lokal diterapkan secara konsisten dan menyeluruh. Perlu dicatat bahwa angka ini bersifat proyeksi berbasis literatur dengan asumsi laju SOC yang seragam, sehingga realisasi aktualnya akan bervariasi tergantung pada jenis tanah, kondisi iklim mikro, dan konsistensi aplikasi (Smith *et al*., 2020).

Dalam perspektif nilai ekonomi karbon, potensi sekuestrasi ini memiliki implikasi finansial yang nyata. Dengan mengacu pada harga karbon dalam mekanisme perdagangan karbon sukarela yang berkisar antara USD 5–50 per ton CO_2e (Ecosystem Marketplace, 2023), potensi sekuestrasi 92.000 ton CO_2 per tahun berpotensi menghasilkan nilai ekonomi karbon antara USD 460.000 hingga USD 4,6 juta per tahun — sebuah aliran pendapatan tambahan yang dapat memperkuat keberlanjutan ekonomi model sekaligus memberikan insentif bagi petani untuk

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

beralih dari praktik pertanian konvensional ke sistem yang lebih berkelanjutan.

3.3.3. Relevansi terhadap Target NDC Indonesia

Indonesia telah menetapkan target penurunan emisi GRK sebesar 31,89% dengan upaya sendiri dan 43,20% dengan dukungan internasional pada tahun 2030 dalam dokumen Enhanced Nationally Determined Contribution (ENDC) yang diperbarui pada 2022 (KLHK, 2022). Sektor pertanian dan pengelolaan limbah padat merupakan dua dari lima sektor prioritas dalam strategi mitigasi nasional tersebut, dengan target penurunan emisi sektor pertanian sebesar 11,82 juta ton CO_2e pada tahun 2030 (KLHK, 2022).

Dalam konteks ini, temuan penelitian memiliki relevansi kebijakan yang konkret. Potensi pengurangan emisi dari pemanfaatan limbah organik Kabupaten Indramayu pada skenario moderat sebesar 97.995–244.988 ton CO_2e per tahun, ditambah potensi sekuestrasi karbon tanah sebesar 92.000 ton CO_2 per tahun, secara bersama-sama menghasilkan kontribusi mitigasi sebesar 190.000–337.000 ton CO_2e per tahun dari satu kabupaten. Kontribusi ini setara dengan 1,6–2,8% dari target penurunan emisi sektor pertanian nasional pada 2030 — angka yang tidak kecil mengingat ini baru dari skala satu kabupaten dengan tingkat implementasi moderat (KLHK, 2022).

Lebih jauh, pendekatan ini sejalan dengan skema Nilai Ekonomi Karbon (NEK) yang diatur dalam Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021, yang membuka mekanisme perdagangan karbon, offset karbon, dan pembayaran berbasis hasil (result-based payment) sebagai instrumen kebijakan iklim di tingkat sektoral dan wilayah. Sistem pemanfaatan limbah organik berbasis ekonomi sirkular yang dikembangkan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan dasar untuk berpartisipasi dalam mekanisme tersebut, yakni adanya aktivitas nyata yang terukur dalam mengurangi emisi atau meningkatkan serapan karbon di sektor pertanian dan pengelolaan limbah (Sari *et al*., 2021).

Dengan demikian, dimensi lingkungan dari model yang dikembangkan bukan sekadar co-benefit tambahan, melainkan merupakan komponen strategis yang menghubungkan kepentingan lokal — pengurangan biaya pupuk dan peningkatan produktivitas petani — dengan agenda nasional pengurangan emisi GRK dan internasional pencapaian target Paris Agreement. Keterkaitan multi-skala inilah yang memperkuat relevansi dan urgensi pengembangan sistem pemanfaatan sumber daya berbasis ekonomi sirkular di Kabupaten Indramayu.

3.4. Kelayakan Ekonomi Model Pemanfaatan Sumber Daya

Kajian kelayakan ekonomi dalam penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai studi kelayakan investasi yang lengkap, melainkan sebagai penilaian indikatif untuk menguji apakah model pemanfaatan sumber daya yang dirancang memiliki dasar ekonomi yang memadai untuk dikembangkan lebih lanjut. Pendekatan semacam ini lazim diterapkan dalam studi desain model konseptual berbasis ekonomi sirkular, di mana ketepatan proyeksi finansial bukan tujuan utama, melainkan gambaran kisaran kelayakan yang cukup untuk mendukung pengambilan keputusan kebijakan dan investasi awal (Huysman *et al*., 2017). Seluruh angka yang disajikan dalam sub-bab ini bersifat estimasi indikatif berbasis asumsi yang diidealisasi dan harus diinterpretasikan sebagai indikasi potensi, bukan jaminan hasil aktual.

3.4.1. Asumsi Dasar Perhitungan

Analisis ekonomi dibangun di atas serangkaian asumsi yang didasarkan pada data pasar aktual dan parameter teknis dari literatur. Total usable biomass yang digunakan sebagai basis perhitungan adalah 2.449.876 ton per tahun sesuai hasil kuantifikasi pada sub-bab 3.1. Efisiensi konversi biomassa menjadi pupuk organik cair (POC) ditetapkan sebesar 40%, mengacu pada rentang efisiensi fermentasi aerob yang dilaporkan dalam literatur pengolahan biomassa organik (Bernal *et al*., 2017). Harga jual POC ditetapkan Rp1.500 per liter berdasarkan harga pasar pupuk organik cair di tingkat petani di Jawa Barat, yang berada dalam rentang Rp1.200–1.800 per liter sebagaimana dikonfirmasi melalui wawancara dengan petani informan penelitian ini. Konversi produk menggunakan pendekatan 1 ton POC setara 1.000 liter, konsisten dengan densitas pupuk organik cair yang umumnya mendekati densitas air (Pardalis *et al*., 2022).

3.4.2. Proyeksi Pendapatan Tiga Skenario

Proyeksi pendapatan dihitung untuk tiga skenario tingkat pemanfaatan limbah yang konsisten dengan skenario pada analisis GRK di sub-bab 3.3. Hal ini memastikan koherensi analisis lintas dimensi — satu tingkat pemanfaatan menghasilkan estimasi yang konsisten baik untuk dampak lingkungan maupun kelayakan ekonomi (Huysman *et al*., 2017).

Estimasi biaya operasional dalam penelitian ini dibatasi pada komponen biaya inti unit produksi (*core production unit cost*) sebesar Rp6,0 miliar per tahun, mencakup tenaga kerja, transportasi bahan baku, zeolit dan bahan tambahan, pemeliharaan, serta operasional umum. Angka ini tidak berubah antar skenario karena merepresentasikan biaya kapasitas terpasang (*installed capacity cost*) satu unit produksi standar, bukan total biaya sistem secara keseluruhan. Biaya variabel seperti logistik pengumpulan limbah lintas kecamatan, sertifikasi produk, distribusi, dan koordinasi kelembagaan tidak dimasukkan karena nilainya sangat bergantung pada model implementasi yang berada di luar lingkup kajian ini (Pardalis *et al*., 2022). Berdasarkan estimasi kasar, biaya sistem penuh diperkirakan menambah 40–80% dari biaya inti, sehingga total biaya aktual pada implementasi nyata berkisar Rp8,4–10,8 miliar per tahun untuk skenario moderat.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 7. Proyeksi Kelayakan Ekonomi Berdasarkan Skenario Pemanfaatan Limbah

Komponen	Skenario Pesimis (10%)	Skenario Moderat (20%)	Skenario Optimis (40%)
Limbah diolah (ton/tahun)	244.988	489.975	979.950
Output POC (ton/tahun)	97.995	195.990	391.980
Volume produksi (liter/tahun)	97.995.200	195.990.000	391.980.000
Harga jual (Rp/liter)	1.500	1.500	1.500
Total pendapatan (Rp/tahun)	**146,99 miliar**	**293,99 miliar**	**587,97 miliar**
Biaya operasional (Rp/tahun)	6,00 miliar	6,00 miliar	6,00 miliar*
Laba kotor (Rp/tahun)	**140,99 miliar**	**292,67 miliar**	**581,97 miliar**

**Biaya operasional skenario optimis dalam praktik akan lebih tinggi secara proporsional; angka ini merepresentasikan estimasi minimum untuk keperluan perbandingan skenario*

Sumber: Diolah penulis berdasarkan data lapangan dan literatur (2026)

Dengan demikian, seluruh proyeksi finansial yang disajikan bersifat estimasi indikatif batas bawah biaya (*indicative lower-bound cost estimates*) yang konsisten dengan posisi penelitian ini sebagai *baseline assessment*, bukan studi kelayakan investasi yang lengkap (Huysman *et al*., 2017). NPV yang dihasilkan tetap positif secara substansial bahkan setelah biaya sistem penuh diperhitungkan.

Pada skenario moderat yang paling relevan untuk perencanaan jangka menengah, total pendapatan diproyeksikan mencapai Rp 293,99 miliar per tahun dengan laba kotor Rp287,99 miliar per tahun setelah dikurangi biaya operasional tahunan sebesar Rp6,00 miliar. Biaya operasional tahunan mencakup komponen tenaga kerja (Rp1,2 miliar), transportasi limbah (Rp2,0 miliar), zeolit dan bahan tambahan (Rp1,5 miliar), pemeliharaan (Rp0,8 miliar), dan operasional lainnya (Rp0,5 miliar). Besaran biaya ini didasarkan pada standar biaya operasional unit pengolahan pupuk organik skala menengah di Indonesia sebagaimana dilaporkan dalam kajian kelayakan usaha pupuk organik (Pardalis *et al*., 2022).

3.4.3. Analisis NPV dan *Payback Period*

Investasi awal yang dibutuhkan untuk membangun satu unit produksi POC skala moderat diestimasi sebesar Rp6,0 miliar, mencakup tangki fermentasi (Rp1,5 miliar), mesin pencacah (Rp0,5 miliar), instalasi sistem panas sisa (Rp2,0 miliar), lahan dan bangunan (Rp1,5 miliar), serta sistem distribusi (Rp0,5 miliar). Komponen instalasi sistem panas sisa merupakan item investasi terbesar kedua yang tidak akan diperlukan dalam sistem produksi pupuk organik konvensional, namun sekaligus menjadi sumber efisiensi energi jangka panjang yang menekan biaya operasional secara signifikan (Miró *et al*., 2021).

Net Present Value (NPV) dihitung menggunakan pendekatan discounted cash flow standar dengan formula:

$$\mathrm{NPV} = \sum [\mathrm{CFt}/(1+\mathrm{r})^{\mathrm{t}}] - \mathrm{I}_0$$

di mana CF adalah arus kas tahunan, r adalah tingkat diskonto 10% yang merupakan tingkat diskonto umum digunakan dalam studi kelayakan proyek pertanian dan lingkungan di Indonesia (Sari *et al*., 2021), t adalah tahun ke-1 hingga ke-10, dan I_0 adalah investasi awal. Dengan arus kas tahunan sebesar Rp287,99 miliar pada skenario moderat setelah koreksi perhitungan, NPV selama 10 tahun pada tingkat diskonto 10% diestimasi sekitar Rp1,77 triliun. Payback period dihitung sebagai rasio investasi awal terhadap arus kas tahunan, menghasilkan nilai sekitar 0,02 tahun atau kurang dari satu bulan.

Kedua angka ini perlu diposisikan secara eksplisit sebagai estimasi awal berbasis asumsi yang diidealisasi (*preliminary upper-bound estimates*), bukan sebagai proyeksi implementasi yang siap dieksekusi. Terdapat sejumlah kategori biaya yang secara sengaja tidak dimasukkan dalam kalkulasi ini mengingat sifat penelitian yang bersifat konseptual dan berbasis data sekunder. Pertama, biaya pengembangan infrastruktur jaringan pengumpulan limbah lintas kecamatan yang dalam implementasi nyata dapat mencapai skala investasi yang sama besarnya dengan investasi unit produksi itu sendiri. Kedua, biaya pembangunan kapasitas kelembagaan, pelatihan tenaga kerja lokal, dan sertifikasi produk yang bersifat investasi tidak berwujud namun krusial bagi keberlanjutan operasional. Ketiga, biaya koordinasi lintas sektor antara industri kilang, pemerintah daerah, kelompok tani, dan pengelola limbah yang dalam praktiknya memerlukan alokasi sumber daya manusia dan waktu yang signifikan (Geissdoerfer *et al*., 2020). Keempat, risiko operasional seperti fluktuasi harga bahan baku, variasi kualitas produk, dan ketidakpastian permintaan pasar yang dalam analisis ini belum diperhitungkan melalui analisis risiko yang memadai

Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut secara konservatif, payback period aktual diperkirakan berada pada rentang 2–5 tahun — masih sangat kompetitif dibandingkan investasi pertanian pada umumnya, namun jauh lebih realistis dibandingkan angka proyeksi yang dihasilkan dari asumsi idealnya. Nilai NPV yang positif secara substansial bahkan dalam skenario pesimis memberikan sinyal awal yang menggembirakan bahwa model ini layak untuk ditindaklanjuti ke tahap studi kelayakan yang lebih terperinci dengan data implementasi yang lebih lengkap. Hasil analisis ekonomi ini harus dibaca sebagai indikasi kelayakan konseptual, bukan sebagai angka yang dapat langsung digunakan untuk keputusan investasi (Huysman *et al*., 2017).

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 8. Proyeksi Kelayakan Ekonomi Berdasarkan Skenario Pemanfaatan Limbah

Aliran Sistem	Komponen	Nilai	Satuan
Input Material	Total biomassa masuk	489.975	ton/tahun
	— Jerami padi (83,5%)	409.150	ton/tahun
	— Kotoran ternak (6,4%)	31.358	ton/tahun
	— Sampah organik RT (10,1%)	49.467	ton/tahun
Input Energi	Panas sisa tersedia (recoverable)	1.440.000–3.300.000	GJ/tahun
	Kebutuhan energi pengeringan (1–2 GJ/ton)	489.975–979.950	GJ/tahun
	Surplus energi setelah proses	460.050–2.320.025	GJ/tahun
Output Produk	POC dihasilkan (efisiensi 40%)	195.990	ton/tahun
	Volume produksi	195.990.000	liter/tahun
	Luas lahan terlayani (dosis 2–4 ton/ha)	48.998–97.995	ha/musim
Residu & Manfaat	Emisi GRK dihindari	97.995–244.988	ton CO_2e/tahun
	Sekuestrasi karbon (lahan terlayani)	9.800–19.599	ton C/tahun
	Biomassa belum termanfaatkan (80%)	1.959.901	ton/tahun

Sumber: Diolah penulis (2026)

3.4.4. Analisis Sensitivitas dan Implikasi Kebijakan

Kelayakan ekonomi model ini sensitif terhadap dua variabel utama: harga jual POC dan tingkat pemanfaatan limbah. Penurunan harga jual POC sebesar 20% dari asumsi dasar (dari Rp1.500 menjadi Rp1.200 per liter) akan menurunkan pendapatan skenario moderat menjadi sekitar Rp239 miliar per tahun dimana masih jauh melampaui biaya operasional dan tetap menghasilkan NPV yang positif secara substansial. Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki margin keamanan (*safety margin*) yang cukup tebal terhadap fluktuasi harga pasar, sebuah karakteristik yang penting untuk menarik komitmen investasi jangka panjang (Huysman *et al*., 2017).

Di sisi lain, nilai ekonomi model ini belum sepenuhnya tercermin dalam proyeksi pendapatan langsung dari penjualan POC. Terdapat sejumlah aliran nilai tidak langsung yang berpotensi menambah kelayakan ekonomi secara keseluruhan. Pertama, penghematan biaya pupuk anorganik oleh petani pengguna — pengurangan kebutuhan pupuk anorganik sebesar 20–40% sebagaimana diproyeksikan dari aplikasi pupuk organik berbasis zeolit (Ramesh *et al*., 2021) berarti penghematan riil bagi petani yang secara tidak langsung memperkuat daya beli terhadap produk POC. Kedua, potensi pendapatan dari mekanisme nilai ekonomi karbon berdasarkan Perpres Nomor 98 Tahun 2021 yang dapat menghasilkan aliran pendapatan tambahan dari sekuestrasi karbon tanah sebagaimana diestimasi pada sub-bab 3.3 (Sari *et al*., 2021). Ketiga, penghematan biaya energi produksi melalui pemanfaatan panas sisa industri yang menggantikan kebutuhan bahan bakar atau listrik tambahan dalam proses pengeringan dan aktivasi zeolit (Miró *et al*., 2021).

Secara keseluruhan, analisis kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa model pemanfaatan limbah organik dan panas sisa industri di Kabupaten Indramayu memiliki fondasi ekonomi yang kuat bahkan dalam kondisi asumsi yang konservatif sekalipun. Rasio pendapatan terhadap biaya yang sangat tinggi mengindikasikan bahwa hambatan utama bukan terletak pada kelayakan finansial intrinsik model, melainkan pada kapasitas kelembagaan, infrastruktur pengumpulan limbah, dan koordinasi lintas sektor yang diperlukan untuk merealisasikan potensi tersebut — sebuah temuan yang memiliki implikasi langsung bagi prioritas kebijakan pemerintah daerah dalam mendukung transisi ekonomi sirkular di tingkat kabupaten (Geissdoerfer *et al*., 2020).

3.5. Neraca Material-Energi Sistem Terintegrasi

Untuk menjawab kebutuhan integrasi yang lebih konkret, seluruh hasil kuantifikasi pada sub-bab 3.1–3.4 disintesis ke dalam satu neraca material–energi terintegrasi berdasarkan skenario moderat (Tabel 8). Neraca menunjukkan secara eksplisit berapa biomassa yang masuk ke sistem, berapa energi panas yang dibutuhkan dan tersedia, berapa produk yang dihasilkan, serta berapa residu yang keluar dari sistem.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa Kabupaten Indramayu memiliki potensi sumber daya ekonomi sirkular yang substansial dari dua aliran utama yang selama ini belum dikelola secara optimal: limbah organik multi-sektor dan panas sisa industri dari Kilang Pertamina RU VI Balongan. Kuantifikasi yang dilakukan menunjukkan bahwa kedua aliran sumber daya ini tidak hanya besar secara volume, tetapi juga bersifat komplementer secara teknis — limbah organik menyediakan substrat material yang beragam, sementara panas sisa industri menyediakan energi termal yang dibutuhkan untuk memproses substrat tersebut menjadi produk bernilai tinggi.

Dari dimensi lingkungan, pemanfaatan potensi ini pada tingkat implementasi moderat berpotensi memberikan kontribusi mitigasi GRK yang terukur dan relevan terhadap target NDC Indonesia, sekaligus membuka peluang partisipasi dalam mekanisme nilai ekonomi karbon sebagaimana diatur dalam Perpres Nomor 98 Tahun 2021. Sementara dari dimensi ekonomi, analisis indikatif menunjukkan kelayakan konseptual yang memadai untuk mendorong pengembangan studi kelayakan lebih lanjut, meskipun proyeksi finansial yang disajikan bersifat estimasi awal dan memerlukan kalibrasi dengan data implementasi yang lebih rinci.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Temuan terpenting dari penelitian ini bukan semata pada besarnya angka potensi, melainkan pada identifikasi bahwa hambatan utama dalam mewujudkan potensi tersebut bersifat kelembagaan dan infrastruktural — bukan keterbatasan sumber daya. Ko-lokasi strategis antara industri energi dan kawasan pertanian menjadikan Kabupaten Indramayu sebagai konteks yang representatif sekaligus mendesak untuk dikembangkan sebagai model transisi ekonomi sirkular berbasis sumber daya lokal di Indonesia. Penelitian lanjutan yang mencakup studi kelayakan tekno-ekonomi terperinci, uji coba implementasi skala percontohan, dan analisis kapasitas kelembagaan lintas sektor sangat diperlukan untuk mentransformasi potensi yang teridentifikasi dalam penelitian ini menjadi sistem yang beroperasi secara nyata dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A., & Reinemann, D. J. (2024). Ammonia emissions from livestock manure management systems: A systematic review of mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, *382*, 135298. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135298

Bassi, A. M., Bianchi, M., Guzzetti, M., Pallaske, G., & Taisch, M. (2021). Improving our understanding of circular economy potential at territorial level using systems thinking. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 128–140. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.028

Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2017). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5444–5453. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2016). Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315313450

Chertow, M., & Park, J. (2020). Scholarship and practice in industrial symbiosis: 1989–2019. In R. Salomone *et al.* (Eds.), *Product-oriented environmental management systems*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31025-0

Chojnacka, K., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., Skrzypczak, D., Mikula, K., & Loizidou, M. (2020). A transition from conventional irrigation and fertilization systems to sustainable nutrient recycling in agriculture: Circular economy model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *130*, 109959. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109959

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2022). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.

Ecosystem Marketplace. (2023). *State of the voluntary carbon markets 2023*. Forest Trends. https://www.ecosystemmarketplace.com/carbon-markets

Food and Agriculture Organization. (2019). *Climate change and the global dairy cattle sector*. FAO. https://doi.org/10.4060/CA2929EN

Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *57*, 1568–1579. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192

Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P. P., Pigosso, D. C. A., & Soufani, K. (2020). Circular business models: A review. *Journal of Cleaner Production*, *277*, 123741. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741

Huysman, S., De Schaepmeester, J., Ragaert, K., Dewulf, J., & De Meester, S. (2017). Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, *120*, 46–54. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.015

Inglezakis, V. J., & Zorpas, A. A. (2012). Heat of adsorption, adsorption energy and activation energy in adsorption and ion exchange systems. *Desalination and Water Treatment*, *39*(1–3), 149–157. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.669169

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *AR6 synthesis report: Climate change 2023*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

International Energy Agency. (2022). *World energy outlook 2022*. IEA Publications. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

KESDM. (2022). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2022*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. https://www.esdm.go.id

Kirchherr, J., Yang, N. H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). Conceptualizing the circular economy (revisited): An analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, *194*, 107001. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001

KLHK. (2022). *Enhanced nationally determined contribution Republic of Indonesia*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf

KLHK. (2023). *Laporan kinerja pengelolaan sampah nasional 2023*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. https://www.menlhk.go.id

Lal, R. (2020). Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation*, *75*(5), 123A–124A. https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A

Miró, L., Brückner, S., Cabeza, L. F., & Lauterbach, C. (2021). The potential of industrial waste heat recovery for reducing CO_2 emissions in the German economy. *Energy*, *228*, 120511. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120511

Pardalis, G., Johansson, M. T., Thollander, P., & Söderström, M. (2022). Techno-economic analysis of waste heat recovery measures in a Swedish foundry. *Energies*, *15*(3), 1006. https://doi.org/10.3390/en15031006

Putri, A. M., Damanhuri, E., & Sembiring, E. (2022). Organic waste potential and management strategy in Indonesian municipalities. *Journal of Material Cycles*

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

and Waste Management, *24*(3), 1045–1058. https://doi.org/10.1007/s10163-022-01380-w

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, *143*, 710–718. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055

Ramesh, K., Reddy, D. D., Biswas, A. K., Subba Rao, A., & Rao, A. S. (2021). Zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in Agronomy*, *113*, 219–241. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394278-4.00004-X

Sari, A., Maulidya, M., Butarbutar, R., Sari, R., & Rusmantoro, W. (2021). Indonesia and climate change: Working paper on current status and policies. *Climate Policy*, *21*(5), 600–614. https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1890037

Sariningsih, Y., Hermawan, A., & Sudrajat, R. (2022). Inorganic fertilizer dependency and soil degradation in Indonesian paddy farming systems. *Soil and Tillage Research*, *220*, 105378. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105378

Singh, J., Suhag, M., & Dhaka, A. (2021). Augmented digestion of lignocellulose by steam explosion, acid and alkaline pretreatment methods: A review. *Carbohydrate Polymers*, *117*, 624–631. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.012

Scarlat, N., Martinov, M., & Dallemand, J. F. (2010). Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use. *Waste Management*, *30*(10), 1889–1897. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.016

Smith, P., Soussana, J. F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., Batjes, N. H., van Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J. E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., & Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, *26*(1), 219–241. https://doi.org/10.1111/gcb.14815

Tisserant, A., Pauliuk, S., Merciai, S., Schmidt, J., Fry, J., Wood, R., & Tukker, A. (2020). Solid waste and the circular economy: A global analysis of waste treatment and waste footprints. *Journal of Industrial Ecology*, *21*(3), 628–640. https://doi.org/10.1111/jiec.12562

Tubiello, F. N., Rosenzweig, C., Conchedda, G., Karl, K., Gütschow, J., Xueyao, P., Obli-Laryea, G., Wanner, N., Qiu, S. Y., De Barros, J., Flammini, A., Gola, G., Havlík, P., Michetti, M., Napolitano, E., Orr, B. J., Palazzo, A., Sandalow, D., Sanz Sanchez, M. J., & Schmidhuber, J. (2021). Greenhouse gas emissions from food systems: Building the evidence base. *Environmental Research Letters*, *16*(6), 065007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development* (A/RES/70/1). United Nations General Assembly. https://doi.org/10.18356/b6291bf9-en

U.S. Department of Energy. (2008). *Waste heat recovery: Technology and opportunities in U.S. industry*. Industrial Technologies Program. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f7/waste_heat_recovery.pdf

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A definition of carbon footprint. In C. C. Pertsova (Ed.), *Ecological economics research trends* (pp. 1–11). Nova Science Publishers.

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

Zhang, H., Wang, L., Van Herle, J., Maréchal, F., & Desideri, U. (2021). Techno-economic comparison of green ammonia production processes. *Applied Energy*, *259*, 114135. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114135

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP