

Model Bisnis Biogas Sirkular sebagai Solusi Pengelolaan Limbah Buah di Indonesia: Studi Kasus Proyek Biogas Gamping-Sleman

Fajar Marendra^{1*}, Imas Dwi Dewanti Putri², Ovantia Pradevi¹, Anggun Tati Rahmada Wardhani³

¹ Politeknik AKA Bogor, Kota Bogor, Jawa Barat, Indonesia

² Advanced Research Center for Agroindustrial waste, Net-zero emission, and Alternative energy (ARCANA), Kota Bogor, Jawa Barat, Indonesia

³ Waste Refinery Center, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author: fajarmarendra@kemenperin.go.id



©2026. This open-access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Info Artikel: Diterima 05 Januari 2026 ; Direvisi 28 Juli 2026 ; Disetujui 06 Agustus 2026
Tersedia online : 10 Agustus 2026 ; Diterbitkan secara teratur : Juni 2026



Cara sitasi: Mahendra F, Putri IDD, Pradevi O, Wardhani ATR. Model Bisnis Biogas Sirkular sebagai Solusi Pengelolaan Limbah Buah di Indonesia: Studi Kasus Proyek Biogas Gamping-Sleman. Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia [Online]. 2026 Jun;25(2):196-212. <https://doi.org/10.14710/jkli.81293>.

ABSTRAK

Latar belakang: Pasar Induk Buah Gemah Ripah, Gamping Sleman menghasilkan 3.650 ton limbah buah per tahun yang apabila tidak dikelola dengan baik berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan dan kesehatan masyarakat akibat timbunan bau, peningkatan populasi vektor, dan penurunan kualitas lingkungan di sekitar lokasi. Sebagian limbah tersebut dikelola menggunakan teknologi anaerobic digestion melalui program Biogas Gamping-Sleman (BGS), sehingga mampu menerapkan model bisnis sirkular. Studi ini bertujuan mengevaluasi performa teknis, lingkungan, dan ekonomi dari BGS sebagai model bisnis sirkular yang mengonversi limbah buah menjadi energi terbarukan dan pupuk organik.

Metode: Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus dengan analisis kuantitatif berbasis *Material Flow Analysis* (MFA), performa energi, dan aspek ekonomi. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan, pengukuran operasional biodigester, wawancara semi-terstruktur dengan 160 responden yang meliputi pengelola BGS, pengelola pasar, operator biodigester, dan pengguna biogas, serta kajian dokumen selama tahun 2023–2024. Pemilihan informan pengelola dilakukan secara purposive, sementara pengguna biogas ditetapkan melalui total sampling. Analisis data dilakukan secara deskriptif dan komputasional guna menilai efisiensi material, potensi pengurangan emisi, serta kelayakan finansial sistem.

Hasil: MFA menunjukkan bahwa setiap 1.000 kg limbah buah menghasilkan 40,7 kg biogas dan sekitar 2.885 kg digestat. Sistem BGS mampu menyuplai listrik kepada 155 kios pasar serta menggantikan sebagian konsumsi LPG pada kantin pasar. Analisis teknis menunjukkan bahwa pemanfaatan biogas berkontribusi pada pengurangan emisi sebesar 89,7 kg CO₂-eq per ton sampah organik yang diolah. Secara ekonomi, BGS menghasilkan keuntungan bersih sekitar Rp116 juta per tahun dengan periode pengembalian investasi 14,24 tahun. Penjualan listrik, pupuk organik, serta penghematan energi menjadi sumber utama nilai ekonomi, sedangkan manfaat sosial muncul melalui peningkatan kebersihan pasar dan kemandirian energi lokal.

Simpulan: Sistem BGS efektif sebagai model bisnis sirkular yang mengubah limbah buah menjadi energi dan pupuk organik sehingga meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi emisi, dan menciptakan manfaat ekonomi. Optimalisasi pemanfaatan digestat sebagai produk bernilai tambah direkomendasikan untuk meningkatkan pendapatan dan mempercepat pengembalian investasi sistem.

Kata kunci: Ekonomi sirkular; Biogas komunitas; limbah buah pasar; Material flow analysis, model bisnis terbarukan

ABSTRACT

Circular Biogas Business Model as a Solution for Fruit Waste Management in Indonesia: A Case Study of the Gamping-Sleman Biogas Project

Background: Gemah Ripah Fruit Wholesale Market in Gamping, Sleman, generates approximately 3,650 tons of fruit waste annually, a portion of which is managed through anaerobic digestion technology under the Biogas Gamping–Sleman (BGS) program, enabling the implementation of a circular business model. This study aimed to evaluate the technical, environmental, and economic performance of BGS as a circular business model that converts fruit waste into renewable energy and organic fertilizer.

Method: This study employed a case-study approach using quantitative analyses based on Material Flow Analysis (MFA), energy performance assessment, and economic evaluation. Data were collected through field observations, biodigester operational measurements, semi-structured interviews with 160 respondents, including BGS managers, market administrators, biodigester operators, and biogas users, as well as document reviews conducted during 2023–2024. Key informants were selected using purposive sampling, while biogas users were included through total sampling. The collected data were analyzed descriptively and computationally to assess material efficiency, emission reduction potential, and the financial feasibility of the system.

Result: The MFA revealed that every 1,000 kg of fruit waste generated 40.7 kg of biogas and approximately 2,885 kg of digestate. The BGS system supplied electricity to 155 market stalls and partially substituted liquefied petroleum gas (LPG) consumption in the market canteen. Technical analysis indicated that biogas utilization reduced greenhouse gas emissions by 89.7 kg CO₂-eq per ton of organic waste treated. Economically, the system generated a net annual profit of approximately IDR 116 million, with a payback period of 14.24 years. Electricity sales, organic fertilizer production, and energy cost savings constituted the primary sources of economic value, while social benefits included improved market cleanliness and enhanced local energy self-sufficiency.

Conclusion: The BGS system is proven effective as a circular business model that enhances material efficiency, reduces emissions, lowers energy costs, and creates new value streams for market management. These findings highlight that integrating biogas and fertilizer production from fruit waste is a strategic solution for urban organic waste management and holds strong potential for replication in other traditional markets across Indonesia.

Keywords: *Circular economy; Community Biogas; Market fruit waste; material flow analysis; Renewable business model*

PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk perkotaan yang terus meningkat dan perubahan pola konsumsi masyarakat telah menyebabkan timbunan limbah organik semakin bertambah. Pasar tradisional dan pasar induk menjadi salah satu sumber limbah organik yang cukup besar karena tingginya aktivitas perdagangan produk hortikultura.¹ Kondisi ini masih menjadi tantangan di berbagai negara berkembang, termasuk Indonesia, terutama karena pengelolaan sampah masih banyak mengandalkan sistem pengumpulan, pengangkutan, dan pembuangan akhir. Di sisi lain, kemampuan untuk mengolah dan memanfaatkan kembali limbah organik sebagai sumber daya masih belum optimal.^{1–3}

Limbah buah merupakan salah satu jenis limbah organik yang mudah mengalami pembusukan karena memiliki kadar air dan kandungan bahan organik yang tinggi. Apabila tidak segera ditangani, penumpukan limbah dapat menimbulkan bau yang mengganggu masyarakat dan pekerja di sekitar lokasi serta menarik kehadiran lalat dan vektor lainnya. Proses pembusukan juga dapat menghasilkan cairan yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa persoalan limbah buah tidak hanya berkaitan dengan jumlah sampah yang harus dibuang, tetapi juga berhubungan dengan kualitas lingkungan dan kesehatan lingkungan masyarakat di sekitar sumber limbah. Karena itu, pengelolaan limbah organik dari pasar perlu dilakukan dengan cara yang dapat mengurangi beban pencemaran sekaligus meminimalkan potensi gangguan terhadap kesehatan lingkungan.

Salah satu alternatif yang dapat diterapkan adalah anaerobic digestion (AD). Teknologi ini memungkinkan bahan organik diolah menjadi biogas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan dan menghasilkan digestate yang berpotensi digunakan sebagai pupuk organik.^{4–7} Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan proses AD dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku, konfigurasi reaktor, kondisi operasi, dan stabilitas proses. Selain menghasilkan energi, pemanfaatan digestate juga dapat mendukung pemulihan nutrisi dan penerapan prinsip ekonomi sirkular.^{4,5} Dari sisi lingkungan, AD berpotensi mengurangi dampak yang muncul dari pengelolaan limbah secara konvensional, meskipun manfaat yang dihasilkan tetap bergantung pada karakteristik dan sistem pengelolaan yang diterapkan.^{6,7} Oleh sebab itu, penerapan AD pada limbah organik pasar memiliki peluang untuk menggabungkan pengelolaan limbah dengan pemulihan energi dan sumber daya.

Salah satu contoh penerapan tersebut terdapat di Pasar Induk Buah Gemah Ripah, Gamping, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Aktivitas perdagangan di pasar ini menghasilkan sekitar 3.650 ton limbah buah setiap tahun. Sebagian limbah tersebut telah dimanfaatkan melalui Proyek Biogas Gamping–Sleman (BGS) dengan menggunakan teknologi AD untuk menghasilkan biogas dan energi listrik. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa limbah buah di lokasi tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi biogas dan listrik serta memberikan manfaat lingkungan dan sosial-ekonomi.^{8,9} Kajian lain juga telah mengevaluasi dampak lingkungan dari sistem produksi listrik berbasis limbah buah menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA).¹⁰ Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa BGS merupakan contoh nyata pemanfaatan limbah buah melalui teknologi AD yang telah diterapkan di tingkat pasar.

Meskipun demikian, penelitian mengenai BGS yang telah dilakukan sebelumnya masih lebih banyak melihat aspek produksi biogas dan energi, penerapan konsep zero waste, serta dampak lingkungan. Pada penelitian mengenai AD secara umum, kajian yang dilakukan juga banyak berfokus pada kinerja proses, pemurnian biogas, karakteristik bahan baku, dan evaluasi lingkungan.^{4,6,7,10–13} Sementara itu, kajian mengenai ekonomi sirkular lebih banyak membahas pemulihan material dan energi serta bagaimana limbah dapat diubah menjadi sumber daya yang memiliki nilai baru.^{5,14–16} Berbagai penelitian tersebut telah memberikan dasar yang penting, tetapi kajian yang menghubungkan aspek teknis, aliran material, penciptaan nilai ekonomi, manfaat lingkungan, dan perspektif kesehatan lingkungan dalam satu sistem pengelolaan limbah buah berbasis AD masih terbatas. Kondisi ini terutama relevan untuk sistem pengelolaan limbah pasar di wilayah tropis yang memiliki karakteristik timbunan limbah organik dan kondisi lingkungan yang berbeda dengan wilayah lainnya.

Keterbatasan tersebut menunjukkan perlunya kajian yang melihat sistem pengelolaan limbah secara lebih menyeluruh. Kemampuan suatu instalasi AD dalam menghasilkan biogas saja belum cukup untuk menggambarkan keberlanjutan sistem. Pengelolaan limbah juga perlu dilihat dari bagaimana material mengalir dan dimanfaatkan kembali, bagaimana nilai ekonomi dapat diciptakan dari produk yang dihasilkan, seberapa besar manfaat lingkungan yang diperoleh, serta bagaimana pengelolaan tersebut dapat mengurangi potensi gangguan lingkungan yang berkaitan dengan kesehatan masyarakat. Pendekatan seperti ini penting untuk memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai keberlanjutan suatu sistem pengelolaan limbah dan dapat menjadi dasar bagi pengelola pasar maupun pemangku kebijakan dalam mengembangkan sistem pengelolaan limbah organik yang lebih baik.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan dengan mengambil Proyek Biogas Gamping–Sleman (BGS) sebagai studi kasus. Evaluasi teknis dilakukan melalui kajian kinerja digester dan *Material Flow Analysis* (MFA) untuk melihat bagaimana limbah buah yang masuk ke dalam sistem mengalami transformasi menjadi energi dan produk bernilai tambah. Dari sisi ekonomi, *Circular Business Model Canvas* (CBMC) dan analisis biaya-manfaat digunakan untuk menggambarkan penciptaan nilai dan keberlanjutan ekonomi sistem. Sementara itu, aspek lingkungan dikaji melalui estimasi potensi pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) akibat pemanfaatan limbah melalui AD dibandingkan dengan pengelolaan konvensional. Dalam kaitannya dengan kesehatan lingkungan, penelitian ini membahas manfaat pengelolaan limbah yang lebih baik dalam mengurangi potensi penumpukan dan pembusukan limbah yang dapat menimbulkan bau, menarik vektor, dan memengaruhi kualitas lingkungan di sekitar sumber limbah.

Kebaruhan penelitian ini terletak pada upaya menggabungkan beberapa aspek tersebut dalam mengevaluasi sistem pengolahan limbah buah berbasis AD pada tingkat pasar. Pertama, data operasional BGS digunakan untuk menyusun MFA kuantitatif yang menggambarkan perubahan aliran limbah menjadi energi dan produk samping yang memiliki nilai tambah. Kedua, CBMC digunakan untuk melihat bagaimana sumber daya yang sebelumnya dianggap sebagai limbah dapat diolah dan menghasilkan nilai ekonomi melalui pemanfaatan energi dan produk organik. Ketiga, kinerja sistem dikaitkan dengan potensi pengurangan emisi GRK dan manfaat pengelolaan lingkungan, serta dibahas dari perspektif kesehatan lingkungan sebagai salah satu implikasi dari pengelolaan limbah organik yang lebih baik. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai penerapan sistem AD berbasis limbah pasar dalam mendukung ekonomi sirkular.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja teknis, ekonomi, dan lingkungan Proyek Biogas Gamping–Sleman (BGS) sebagai model bisnis sirkular dalam mengonversi limbah buah pasar menjadi energi terbarukan dan pupuk organik, serta membahas implikasi penerapan sistem tersebut terhadap kualitas lingkungan dan kesehatan lingkungan yang berkaitan dengan pengelolaan limbah organik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan bukti empiris mengenai penerapan pengelolaan limbah organik berbasis AD yang tidak hanya layak dari sisi teknis dan ekonomi, tetapi juga mendukung pemulihan sumber daya, pengurangan dampak lingkungan, dan perlindungan kesehatan lingkungan masyarakat.

MATERI DAN METODE

Koleksi Data

Data pendukung yang digunakan dalam penelitian ini meliputi laporan operasional proyek, catatan produksi biogas, data pemanfaatan energi, serta berbagai publikasi yang berkaitan dengan pengelolaan limbah

organik dan energi terbarukan. Informasi tambahan mengenai kebijakan pemerintah, statistik persampahan, dan potensi pengurangan emisi diperoleh dari laporan resmi instansi terkait serta literatur ilmiah yang relevan. Seluruh data kemudian diolah menggunakan pendekatan deskriptif dan komputasional. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi aliran material dalam sistem, menghitung potensi pengurangan emisi gas rumah kaca, serta menilai kelayakan finansial pengelolaan limbah buah melalui teknologi biogas yang diterapkan pada Proyek BGS.

Metode

Penelitian ini dilaksanakan di Proyek BGS dengan memanfaatkan data yang dikumpulkan sepanjang tahun 2023–2024. Informasi yang digunakan berasal dari berbagai sumber, yaitu survei, wawancara, observasi lapangan, dan penelaahan dokumen operasional proyek. Pendekatan tersebut dipilih untuk memperoleh gambaran yang utuh mengenai kondisi teknis instalasi biogas, pola pemanfaatan energi, serta aspek ekonomi dan lingkungan yang terkait dengan pengoperasian sistem.

Wawancara semi-terstruktur dilakukan terhadap 160 responden. Responden tersebut terdiri atas 2 orang pengelola BGS, 1 orang pengelola pasar, 2 orang operator biodigester, dan 155 pengguna biogas. Kelompok pengelola dan operator dipilih secara purposive karena terlibat langsung dalam pengelolaan fasilitas dan memahami proses operasional sehari-hari. Sementara itu, pengguna biogas dilibatkan melalui pendekatan total sampling sehingga seluruh pengguna yang tercatat pada saat penelitian dapat terwakili dalam pengumpulan data. Selama wawancara, responden diminta menjelaskan pengalaman mereka terkait pemanfaatan biogas, manfaat yang diperoleh, kendala yang dihadapi, serta pandangan mereka terhadap keberlanjutan program.

Kunjungan lapangan dilakukan beberapa kali untuk mengamati kondisi aktual fasilitas. Pengamatan mencakup area penerimaan limbah buah, unit pra-pengolahan, biodigester, sistem pemanfaatan biogas, hingga pengolahan residu menjadi pupuk organik. Pada tahap ini, peneliti tidak hanya mencatat kondisi fisik instalasi, tetapi juga membandingkan hasil pengamatan dengan catatan operasional yang tersedia. Langkah tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa data yang digunakan dalam analisis sesuai dengan kondisi yang berlangsung di lapangan.

Penelitian ini menggunakan pendekatan campuran (*mixed-method*) yang mengintegrasikan *Environmental Cost–Benefit Analysis* (CBA), *Material Flow Analysis* (MFA), *Circular Business Model Canvas* (CBMC), dan *Circular Value Loop* (CVL) untuk mengevaluasi kinerja sistem biogas pada Proyek Biogas Gamping–Sleman (BGS). Kombinasi metode tersebut dipilih untuk memperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan sirkularitas sistem. Pendekatan ini mengacu pada rekomendasi Chen *et.al.*¹⁶ yang menekankan pentingnya evaluasi lintas dimensi dalam menilai implementasi ekonomi sirkular pada sistem pengelolaan sumber daya dan energi.

Analisis diawali dengan penerapan *Material Flow Analysis* (MFA) guna menggambarkan pergerakan material di sepanjang sistem pengolahan. Limbah buah yang berasal dari pasar tradisional dipetakan sejak memasuki fasilitas hingga mengalami proses konversi menjadi biogas dan digestat. Hasil analisis ini digunakan untuk menyusun neraca massa serta mengidentifikasi efisiensi pemanfaatan bahan baku pada setiap tahapan proses. Selain memberikan informasi mengenai kinerja teknis instalasi, MFA juga membantu menjelaskan bagaimana limbah yang sebelumnya tidak bernilai dapat dikembalikan ke dalam siklus pemanfaatan sebagai sumber energi dan produk pendukung pertanian.^{17–20}

Aspek ekonomi dan lingkungan dianalisis menggunakan *Environmental Cost–Benefit Analysis* (CBA). Dalam penelitian ini, perhitungan mencakup investasi awal pembangunan instalasi, biaya operasi dan pemeliharaan, penghematan energi yang diperoleh dari pemanfaatan biogas, serta manfaat ekonomi yang berasal dari produk samping sistem. Analisis juga mempertimbangkan dampak lingkungan yang muncul akibat berkurangnya timbunan limbah organik dan potensi penurunan emisi gas rumah kaca. Dengan pendekatan tersebut, evaluasi tidak hanya berfokus pada keuntungan finansial, tetapi juga memperhitungkan manfaat lingkungan yang sering kali tidak tercermin secara langsung dalam nilai pasar.^{21,22}

Untuk memahami bagaimana nilai ekonomi diciptakan dan dipertahankan dalam sistem, penelitian ini memanfaatkan *Circular Business Model Canvas* (CBMC). Melalui kerangka ini, hubungan antara pengelola instalasi, pasar tradisional, pengguna biogas, serta produk yang dihasilkan dapat dipetakan secara sistematis. Analisis difokuskan pada identifikasi proposisi nilai, aktivitas utama, mitra yang terlibat, serta sumber pendapatan yang mendukung keberlanjutan operasional sistem. Dengan demikian, CBMC memberikan gambaran mengenai mekanisme penciptaan nilai yang terbentuk dari pemanfaatan limbah organik sebagai sumber daya ekonomi.^{23,24}

Evaluasi kemudian dilengkapi menggunakan *Circular Value Loop* (CVL) untuk meninjau bagaimana nilai material dan energi dipertahankan dalam sistem. Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi bentuk-bentuk sirkularitas yang terjadi, termasuk pemulihan energi melalui biogas dan pemanfaatan digestat sebagai pupuk organik. Melalui CVL, penelitian dapat menilai sejauh mana sistem BGS mampu memperpanjang siklus pemanfaatan sumber daya dan mengurangi kehilangan nilai sepanjang rantai pengelolaan limbah.^{25,26}

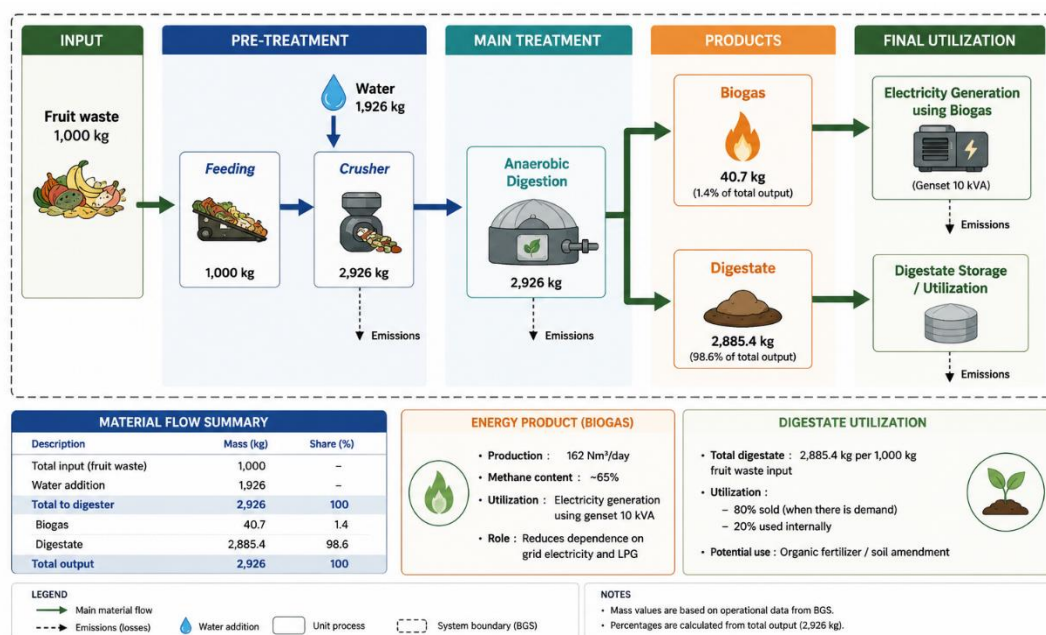
Seluruh hasil analisis diverifikasi melalui observasi lapangan, wawancara dengan pengelola dan operator, serta penelaahan dokumen operasional proyek. Integrasi CBA, MFA, CBMC, dan CVL memungkinkan evaluasi dilakukan secara lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu metode tunggal. Dengan pendekatan

tersebut, penelitian ini tidak hanya menilai performa teknis instalasi biogas, tetapi juga mengkaji manfaat ekonomi, kontribusi lingkungan, serta tingkat sirkularitas yang dihasilkan oleh sistem pengelolaan limbah organik yang diterapkan pada Proyek BGS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Material Flow Analysis (MFA) Sistem Biogas Pasar Buah

Analisis aliran material (*Material Flow Analysis/MFA*) dilakukan untuk menggambarkan bagaimana limbah buah mengalami transformasi sepanjang proses pengolahan di Proyek BGS, mulai dari penerimaan bahan baku hingga menghasilkan energi dan digestat sebagai produk akhir. Hasil MFA yang disajikan pada Gambar 1 menunjukkan bahwa setiap 1.000 kg limbah buah yang masuk ke sistem mengalami serangkaian proses fisik dan biologis yang mengubah karakteristik material sebelum akhirnya dimanfaatkan kembali. Pada tahap awal (*pre-treatment*), limbah buah dicacah menggunakan unit *crusher* untuk memperkecil ukuran partikel dan meningkatkan homogenitas substrat. Setelah itu dilakukan penambahan air sebanyak 1.926 kg sehingga total massa campuran meningkat menjadi 2.926 kg. Penambahan air dalam jumlah yang relatif besar diperlukan untuk membentuk *slurry* dengan karakteristik yang sesuai bagi aktivitas mikroorganisme anaerob, sekaligus menjaga distribusi nutrisi dan mencegah terjadinya pengendapan material selama proses fermentasi^{27,28}.



Gambar 1. *Material Flow Analysis* Proyek BGS

Seluruh campuran substrat kemudian dialirkan ke reaktor anaerobik tipe *fixed dome* sebagai unit pengolahan utama. Di dalam reaktor, bahan organik mengalami degradasi secara bertahap melalui aktivitas komunitas mikroorganisme dalam kondisi tanpa oksigen. Proses ini menghasilkan dua aliran utama, yaitu biogas dan digestat. Berdasarkan data operasional BGS, dari total 2.926 kg campuran yang masuk ke reaktor dihasilkan sekitar 40,7 kg biogas dan 2.885,4 kg digestat. Dengan demikian, sekitar 1,4% massa keluaran sistem berada dalam bentuk biogas, sedangkan 98,6% lainnya tetap berada dalam bentuk digestat.

Sekilas, proporsi biogas yang relatif kecil dapat menimbulkan kesan bahwa hanya sebagian kecil material yang berhasil dimanfaatkan selama proses biodigesti. Namun, interpretasi tersebut kurang tepat apabila hanya didasarkan pada neraca massa. Dalam sistem AD, manfaat utama tidak ditentukan oleh besarnya massa yang berubah menjadi gas, melainkan oleh kemampuan sistem mengonversi fraksi karbon organik menjadi metana yang memiliki nilai energi tinggi. Pada BGS, produksi biogas mencapai rata-rata 162 Nm³ per hari dengan kandungan metana sekitar 65%. Komposisi tersebut menunjukkan bahwa biogas yang dihasilkan memiliki kualitas energi yang cukup baik untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar genset berkapasitas 10 kVA. Dengan kata lain, meskipun massa biogas relatif kecil dibandingkan total aliran material, kontribusinya terhadap pemulihan energi dalam sistem sangat signifikan.

Dominasi digestat dalam neraca massa merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada pengolahan limbah buah dan limbah organik basah lainnya. Tingginya kadar air pada bahan baku menyebabkan sebagian besar massa material tetap berada dalam fase cair atau semi padat setelah proses fermentasi berlangsung. Oleh karena itu, perubahan yang terjadi selama biodigesti lebih banyak berupa transformasi kualitas material

dibandingkan pengurangan massa secara drastis. Fraksi organik yang mudah terdegradasi dikonversi menjadi biogas, sedangkan sebagian besar unsur hara seperti nitrogen, fosfor, kalium, serta senyawa organik yang tidak terdegradasi tetap tersimpan di dalam digestat. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian yang menyebutkan bahwa instalasi biogas tidak hanya berfungsi sebagai teknologi produksi energi, tetapi juga sebagai sarana pemulihan sumber daya (*resource recovery*) dari limbah organik.^{7,10}

Dari perspektif aliran material, hasil MFA menunjukkan bahwa produk utama BGS secara massa sebenarnya adalah digestat, bukan biogas. Kondisi ini menarik karena persepsi umum terhadap instalasi biogas sering kali hanya berfokus pada energi yang dihasilkan, padahal sebagian besar material yang masuk ke dalam sistem tetap berada pada fase digestat. Dalam praktiknya, sekitar 80% digestat yang dihasilkan BGS dapat diserap oleh pengguna eksternal ketika terdapat permintaan, sedangkan sisanya dimanfaatkan secara internal. Fakta ini menunjukkan bahwa digestat tidak diperlakukan sebagai residu akhir yang harus dibuang, melainkan sebagai produk yang masih memiliki nilai guna. Dengan demikian, sebagian besar material yang berasal dari limbah buah tetap berada dalam siklus pemanfaatan setelah proses biodigesti berlangsung.

Temuan tersebut memberikan gambaran bahwa keberhasilan sistem tidak hanya ditentukan oleh jumlah energi yang dihasilkan, tetapi juga oleh kemampuannya mempertahankan material bernilai di dalam sistem. Jika digestat tidak dimanfaatkan lebih lanjut, maka sebagian besar potensi pemulihan sumber daya dari limbah buah tidak akan tercapai secara optimal. Sebaliknya, pemanfaatan digestat memungkinkan unsur hara yang sebelumnya terkandung dalam limbah organik tetap dapat digunakan kembali pada sektor lain. Oleh karena itu, keberadaan aliran digestat menjadi komponen penting yang menentukan kinerja lingkungan sistem secara keseluruhan.

Apabila dibandingkan dengan praktik pembuangan terbuka (*open dumping*), pola aliran material pada BGS menunjukkan perbedaan yang cukup mendasar. Pada sistem pembuangan konvensional, sebagian besar nilai yang terkandung dalam limbah organik hilang melalui proses pembusukan dan pelepasan emisi ke lingkungan. Sebaliknya, pada sistem biodigesti, sebagian karbon organik dikonversi menjadi energi melalui produksi biogas, sementara sebagian besar material dipertahankan dalam bentuk digestat yang masih mengandung nutrisi. Dengan demikian, sumber daya yang terkandung dalam limbah tidak langsung hilang dari sistem, tetapi tetap dapat dimanfaatkan melalui jalur yang berbeda.

Hasil MFA juga memperlihatkan bahwa sebagian besar material yang masuk ke dalam sistem masih dapat ditelusuri pada aliran keluar dalam bentuk biogas maupun digestat. Temuan ini mengindikasikan tingginya tingkat retensi material pada sistem BGS serta menunjukkan bahwa sebagian besar sumber daya yang terkandung dalam limbah buah tetap berada dalam siklus pemanfaatan. Karakteristik tersebut menjadi salah satu keunggulan utama pengolahan limbah berbasis anaerobic digestion, terutama pada limbah buah yang memiliki kandungan air tinggi dan mudah mengalami pembusukan apabila tidak segera ditangani.

Secara keseluruhan, MFA BGS menunjukkan bahwa transformasi yang terjadi selama proses pengolahan lebih didominasi oleh perubahan bentuk dan fungsi material daripada pengurangan massa secara drastis. Sebagian kecil material diubah menjadi energi dalam bentuk biogas dengan kandungan metana yang cukup tinggi, sedangkan sebagian besar lainnya dipertahankan sebagai digestat yang masih memiliki potensi pemanfaatan. Pola aliran ini memperlihatkan bahwa sistem biogas tidak hanya berperan sebagai teknologi pengolahan limbah, tetapi juga sebagai mekanisme pemulihan sumber daya yang mampu mempertahankan nilai material dan energi di dalam sistem pengelolaan limbah organik.

Manfaat Lingkungan dan Sosial dari Proyek BGS

Implementasi Proyek BGS memperlihatkan bahwa pengolahan limbah buah melalui sistem AD mampu memberikan perubahan yang cukup besar terhadap kinerja lingkungan pengelolaan sampah organik pasar. Berdasarkan hasil perhitungan emisi, unit biodigester dengan kapasitas pengolahan sekitar 4 ton limbah buah per hari atau setara dengan 1.460 ton per tahun menghasilkan emisi sebesar 89,7 kg CO₂-eq per ton limbah yang diolah. Dalam satu tahun operasional, total emisi yang dihasilkan tercatat sekitar 130,96 ton CO₂-eq. Nilai tersebut relatif jauh lebih rendah dibandingkan kondisi apabila limbah organik dibiarkan mengalami pembusukan secara terbuka. Pada wilayah beriklim tropis, proses dekomposisi limbah organik tanpa pengendalian dapat menghasilkan emisi sekitar 1.000–1.500 kg CO₂-eq per ton limbah akibat terbentuknya metana selama proses degradasi.²⁹

Perbedaan besarnya emisi antara kedua pendekatan tersebut berkaitan erat dengan mekanisme pengelolaan bahan organik. Pada sistem pembuangan terbuka, limbah buah yang memiliki kadar air tinggi dan mudah terurai akan mengalami fermentasi alami yang menghasilkan metana, namun gas tersebut tidak dapat dikendalikan sehingga langsung dilepaskan ke lingkungan. Kondisi tersebut berbeda dengan proses yang berlangsung dalam biodigester BGS, dimana degradasi bahan organik terjadi dalam ruang tertutup sehingga gas yang terbentuk dapat dikumpulkan dan dimanfaatkan. Dengan mekanisme tersebut, sebagian karbon yang sebelumnya berpotensi menjadi emisi dapat dialihkan menjadi sumber energi yang memiliki nilai manfaat.

Bila dibandingkan dengan skenario baseline open dumping, pengoperasian BGS diperkirakan mampu menghindari pelepasan emisi sebesar 1.329–2.059 ton CO₂-eq per tahun atau setara dengan reduksi sekitar 91–94%. Angka tersebut menunjukkan bahwa pengolahan limbah organik pada tingkat sumber timbulan memiliki

peluang besar untuk menekan kontribusi sektor persampahan terhadap perubahan iklim. Hal ini menjadi penting dalam konteks pengelolaan sampah perkotaan di Indonesia, mengingat sebagian besar pasar tradisional masih menghasilkan limbah organik dalam jumlah besar, sementara sistem pengelolaannya masih banyak bergantung pada proses pengumpulan dan pembuangan akhir.

Dampak lingkungan dari penerapan BGS tidak hanya terlihat dari penurunan emisi yang dihitung melalui pendekatan kuantitatif, tetapi juga terlihat pada perubahan kondisi fisik area pengelolaan limbah. Sebelum adanya pengolahan melalui biodigester, limbah buah yang bersifat mudah membusuk memiliki kecenderungan untuk menimbulkan permasalahan seperti bau, peningkatan kadar lindi, dan munculnya organisme pengganggu di sekitar area penampungan. Ketika sebagian limbah tersebut dialihkan menuju unit biodigester, jumlah material organik yang tertinggal di area pengumpulan mengalami penurunan sehingga potensi gangguan tersebut dapat diminimalkan.

Kondisi tersebut diperkuat berdasarkan hasil wawancara dengan pengelola BGS dan pengamatan langsung selama kegiatan penelitian. Pengelola menyampaikan bahwa sekitar 70% limbah buah yang dihasilkan pasar telah dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku biodigester. Proporsi tersebut memberikan perubahan terhadap pola pengelolaan limbah harian karena sebagian besar limbah tidak lagi berada dalam kondisi menumpuk dalam waktu lama sebelum diangkut. Berdasarkan observasi lapangan, area sekitar fasilitas pengolahan terlihat lebih tertata dengan jumlah timbunan limbah organik yang relatif rendah. Selain itu, pengelola juga menyampaikan bahwa gangguan bau yang sebelumnya sering muncul dari proses pembusukan limbah mengalami penurunan, begitu pula dengan keberadaan lalat di sekitar lokasi pengelolaan.



Gambar 2. Kondisi area pengelolaan limbah sebelum dan sesudah implementasi sistem biogas BGS, (a) Kondisi penumpukan limbah buah sebelum pengolahan biodigester, (b) Kondisi area pengelolaan limbah setelah sebagian besar limbah buah dialihkan ke biodigester.

Perubahan kondisi lingkungan tersebut juga terlihat melalui dokumentasi lapangan yang membandingkan kondisi sebelum dan setelah penerapan sistem biogas (Gambar 2). Pada kondisi awal, limbah buah masih terkonsentrasi pada area penampungan sementara sehingga berpotensi menyebabkan gangguan lingkungan apabila tidak segera dipindahkan. Setelah sistem biodigester diterapkan, sebagian besar limbah diarahkan langsung menuju unit pengolahan sehingga area penampungan menjadi lebih terkendali. Dokumentasi ini memberikan gambaran bahwa manfaat penerapan teknologi biogas tidak hanya dapat dijelaskan melalui angka reduksi emisi, tetapi juga melalui perubahan nyata pada kondisi lingkungan operasional pasar.

Dari perspektif sosial, perubahan tersebut memberikan manfaat yang dirasakan oleh pihak-pihak yang beraktivitas di sekitar pasar. Lingkungan pasar yang lebih bersih dan berkurangnya gangguan bau dapat meningkatkan kenyamanan pedagang maupun pengunjung. Bagi pengelola pasar, pengurangan volume limbah yang harus ditangani melalui sistem pengangkutan konvensional juga dapat membantu mengurangi tekanan operasional dalam pengelolaan sampah. Walaupun manfaat sosial tersebut belum diukur melalui pendekatan kuantitatif seperti survei persepsi masyarakat, hasil wawancara dan observasi menunjukkan adanya perubahan positif terhadap kualitas lingkungan kerja dan aktivitas perdagangan.

Menariknya, kasus BGS menunjukkan bahwa manfaat teknologi AD tidak hanya berada pada tahap akhir pengolahan limbah, tetapi juga memengaruhi sistem pengelolaan sampah sejak dari sumbernya. Ketika limbah organik dapat ditangani lebih dekat dengan lokasi timbunan, kebutuhan untuk menyimpan, mengangkut, dan membuang limbah dalam jumlah besar menjadi berkurang. Pendekatan ini memberikan keuntungan lingkungan karena mampu mengurangi tekanan terhadap sistem persampahan konvensional yang selama ini bergantung pada kapasitas tempat pembuangan akhir.

Walaupun hasil yang diperoleh menunjukkan dampak yang positif, interpretasi terhadap manfaat lingkungan BGS tetap perlu mempertimbangkan beberapa keterbatasan. Estimasi reduksi emisi sangat bergantung pada faktor emisi baseline yang digunakan, karakteristik limbah yang masuk ke dalam biodigester, serta kestabilan

operasi selama periode pengamatan. Selain itu, aspek sosial dalam penelitian ini masih didasarkan pada hasil wawancara dan observasi lapangan sehingga diperlukan kajian lanjutan yang melibatkan lebih banyak responden untuk mengetahui perubahan persepsi masyarakat secara lebih menyeluruh.

Dengan mempertimbangkan hasil perhitungan emisi, kondisi lapangan, serta informasi dari pengelola, Proyek Biogas Gamping–Sleman dapat dipandang sebagai contoh penerapan teknologi pengolahan limbah organik yang memberikan manfaat lingkungan sekaligus sosial. Pengurangan emisi, berkurangnya akumulasi limbah, serta peningkatan kualitas lingkungan pasar menunjukkan bahwa pengelolaan limbah berbasis anaerobic digestion memiliki peluang untuk dikembangkan pada lokasi lain dengan karakteristik limbah organik yang serupa.

Analisis Manfaat Ekonomi Tanpa Memasukkan Aspek Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca

Proyek Biogas Gamping–Sleman (BGS) dibangun dengan investasi awal sekitar Rp1,6 miliar dan dirancang untuk beroperasi selama 30 tahun. Rincian kebutuhan investasi dapat dilihat pada Tabel 1. Dalam penelitian ini, analisis ekonomi difokuskan pada manfaat yang benar-benar dirasakan oleh pengelola dan pengguna sistem. Oleh karena itu, nilai ekonomi dari potensi perdagangan karbon maupun insentif pengurangan emisi belum dimasukkan ke dalam perhitungan. Dengan pendekatan tersebut, hasil yang diperoleh menggambarkan kondisi ekonomi aktual yang terjadi selama operasional proyek.

Tabel 1. *Fixed Capital Cost* Proyek BGS

No	Item	Investasi (Rp x10 ⁶)	Persentase
1	Sistem pra perlakuan limbah buah	150	8,9%
2	Sistem <i>anaerobic digestion</i>	100	5,9%
3	Sistem <i>biogas utilization</i>	85	5,04%
4	Harga tanah	900	53,4%
5	Bangunan pendukung	225	13,35%
6	Pembangkitan listrik	150	8,9%
7	Biaya lain lain	75	4,45
	Total	1.685	100%

Berdasarkan catatan operasional tahun 2023–2024, sumber manfaat ekonomi terbesar berasal dari pemanfaatan energi yang dihasilkan biodigester. Instalasi mampu memproduksi sekitar 43,2 ribu kWh listrik per tahun. Dengan tarif listrik Rp1.444,70 per kWh, nilai ekonomi yang dihasilkan mencapai sekitar Rp62,4 juta per tahun. Selama kunjungan lapangan, pengelola menjelaskan bahwa listrik tersebut dimanfaatkan untuk mendukung aktivitas operasional fasilitas sehingga kebutuhan energi dari sumber eksternal dapat ditekan.

Selain listrik, biogas yang dihasilkan juga dimanfaatkan oleh sepuluh kantin yang beroperasi di area pasar. Menurut hasil wawancara dengan pengguna, pemanfaatan biogas dinilai lebih ekonomis dibandingkan penggunaan LPG secara penuh karena pasokan energi tersedia secara relatif stabil mengikuti ketersediaan bahan baku limbah buah dari pasar. Berdasarkan data penggunaan yang tercatat, manfaat ekonomi dari pemanfaatan biogas tersebut diperkirakan mencapai sekitar Rp72 juta per tahun.

Produk lain yang dihasilkan dari proses biodigesti adalah digestat yang kemudian diolah menjadi pupuk cair. Selama periode pengamatan, volume produksi pupuk cair mencapai sekitar 10 ribu liter per tahun dengan nilai ekonomi sekitar Rp50 juta. Hasil wawancara dengan pengelola menunjukkan bahwa pemanfaatan digestat tidak hanya memberikan tambahan pendapatan, tetapi juga mengurangi kebutuhan penanganan residu hasil proses biodigesti. Dengan demikian, material yang sebelumnya berpotensi menjadi limbah dapat dimanfaatkan kembali sebagai produk yang memiliki nilai guna.

Manfaat ekonomi juga muncul dari berkurangnya biaya yang harus dikeluarkan untuk pengelolaan limbah. Sebelum fasilitas biogas beroperasi, limbah buah dari pasar harus diangkut menuju tempat pemrosesan akhir sehingga menimbulkan biaya transportasi dan retribusi. Setelah sebagian besar limbah diolah melalui biodigester, kebutuhan pengangkutan menjadi lebih rendah. Pengelola pasar menyampaikan bahwa perubahan ini turut membantu menekan biaya operasional yang berkaitan dengan pengelolaan sampah. Jika digabungkan dengan penghematan penggunaan listrik, nilai penghematan tersebut diperkirakan mencapai sekitar Rp38,7 juta per tahun.

Akumulasi seluruh komponen manfaat menghasilkan nilai ekonomi sekitar Rp223,1 juta per tahun. Temuan ini menunjukkan bahwa keberadaan fasilitas biogas tidak hanya menyelesaikan persoalan limbah organik, tetapi juga menghasilkan beberapa sumber manfaat yang dapat dirasakan secara langsung oleh pengelola maupun pengguna sistem.

Di sisi pengeluaran, biaya operasional tahunan tercatat sebesar Rp108 juta sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Komponen terbesar berasal dari kegiatan pemeliharaan yang mencapai sekitar 42% dari total biaya. Berdasarkan informasi dari operator, kebutuhan pemeliharaan cukup tinggi karena beberapa peralatan utama

seperti mesin pencacah, pompa, dan generator bekerja secara rutin setiap hari. Pemeriksaan berkala serta penggantian komponen tertentu perlu dilakukan untuk menjaga stabilitas produksi biogas dan mencegah gangguan operasional.

Komponen biaya lain berasal dari kebutuhan material dan suku cadang dengan porsi sekitar 32%. Besarnya nilai tersebut berkaitan dengan karakteristik limbah yang diolah dan kebutuhan perawatan fasilitas yang menangani sekitar 4 ton limbah buah setiap hari. Sementara itu, biaya tenaga kerja, manajemen, dan energi internal memiliki proporsi yang lebih kecil, namun tetap diperlukan untuk mendukung keberlangsungan operasional sistem secara keseluruhan.

Tabel 2. Biaya Operasi Proyek BGS

No	Item	Investasi (Rp x10 ⁶)	Persentase
1	<i>Maintenance costs</i>	45,36	42%
2	Biaya tenaga kerja	8,64	8%
3	<i>Management expense</i>	8,64	8%
4	Biaya konsumsi energi	10,8	10%
5	Biaya material	34,56	32%
	Total	108	100%

Perbandingan antara manfaat ekonomi dan biaya operasional menunjukkan bahwa BGS masih menghasilkan surplus sekitar Rp116 juta per tahun. Dengan nilai investasi awal sebesar Rp1,6 miliar, periode pengembalian modal diperkirakan berada pada kisaran 14,24 tahun. Hasil ini mengindikasikan bahwa proyek biogas berbasis limbah pasar memiliki prospek yang cukup baik untuk dipertahankan dalam jangka panjang. Keberlanjutan finansial sistem tidak hanya ditopang oleh satu sumber pendapatan, melainkan berasal dari kombinasi produksi listrik, pemanfaatan biogas, penjualan pupuk cair, serta penghematan biaya pengelolaan limbah yang terjadi secara bersamaan.

Analisis Manfaat Ekonomi dengan Memasukkan Aspek Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca

Keberadaan Proyek Biogas Gamping–Sleman (BGS) memperlihatkan bahwa limbah buah dari pasar tradisional tidak selalu berakhir sebagai sampah yang harus dibuang. Selama kegiatan observasi, terlihat bahwa limbah buah yang sebelumnya menumpuk di area pasar kini dimanfaatkan sebagai bahan baku biodigester untuk menghasilkan energi dan pupuk organik. Perubahan tersebut tidak hanya mengurangi volume limbah yang dikirim ke tempat pemrosesan akhir, tetapi juga menciptakan nilai baru dari material yang sebelumnya dianggap tidak memiliki manfaat ekonomi. Dengan pendekatan ini, limbah tidak lagi diposisikan sebagai residu akhir, melainkan sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan kembali dalam suatu siklus yang berkelanjutan.

Walaupun BGS tidak dikembangkan dalam skema *Clean Development Mechanism* (CDM) sebagaimana beberapa proyek biogas di Tiongkok,¹⁶ prinsip yang diterapkan memiliki tujuan yang serupa, yaitu mengurangi dampak lingkungan dari limbah organik sekaligus menghasilkan energi terbarukan. Sebelum fasilitas ini beroperasi, sebagian besar limbah buah harus segera diangkut keluar pasar untuk menghindari pembusukan dan gangguan kebersihan. Setelah biodigester beroperasi, sebagian besar limbah tersebut dapat diolah di lokasi dan dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi. Kondisi ini memberikan manfaat ganda karena persoalan sampah dapat dikurangi tanpa menghilangkan potensi nilai yang masih terkandung di dalam limbah.^{30,31}

Data operasional menunjukkan bahwa intensitas emisi sistem berada pada kisaran 89,7 kg CO₂-eq per ton limbah buah yang diolah.¹⁰ Nilai tersebut jauh lebih rendah dibandingkan emisi yang umumnya dihasilkan dari praktik pembuangan terbuka atau pembusukan tanpa pengendalian yang dapat mencapai lebih dari 1.000 kg CO₂-eq per ton sampah organik.^{32,33} Perbedaan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan biodigester mampu mengurangi pelepasan gas rumah kaca yang biasanya terjadi selama proses dekomposisi alami. Dengan kapasitas pengolahan sekitar 4 ton limbah buah per hari atau setara dengan 1.460 ton per tahun, potensi emisi yang dapat dihindari diperkirakan mencapai sekitar 1.694 ton CO₂-eq setiap tahun. Hal ini berdasarkan laporan yang menunjukkan bahwa sistem biodigester skala komunitas seperti BGS berpotensi menurunkan emisi GRK hingga 80–95% dibandingkan metode pembuangan tradisional.^{11,34} Besarnya angka tersebut menunjukkan bahwa manfaat lingkungan yang dihasilkan BGS tidak hanya bersifat lokal dalam bentuk pengurangan sampah, tetapi juga berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim.

Selain menghasilkan reduksi emisi, BGS juga memberikan manfaat ekonomi langsung dan tidak langsung bagi pasar. Energi biogas digunakan untuk kebutuhan penerangan kios serta substitusi LPG untuk aktivitas memasak di kantin, sementara digestat cair dan padat diproduksi sebagai pupuk organik bernilai jual. Mekanisme ini sejalan dengan temuan penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa integrasi bioenergi dengan produksi biofertilizer dapat meningkatkan kelayakan finansial proyek hingga 20–40% melalui penghematan biaya energi dan pendapatan dari pupuk organik.^{35,36}

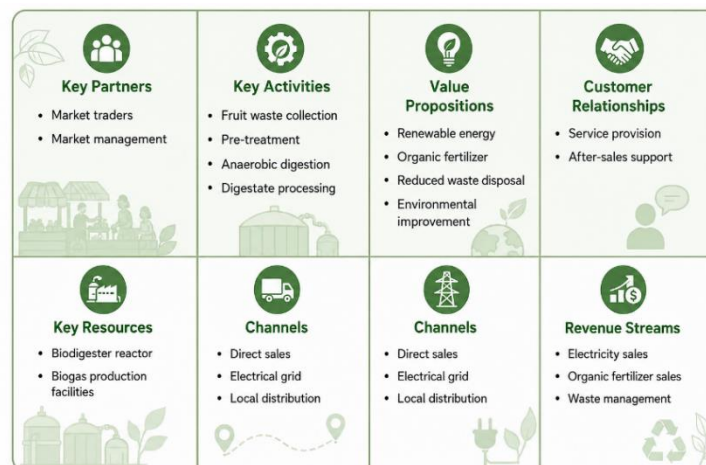
Manfaat tersebut menjadi semakin menarik ketika dikaitkan dengan perkembangan pasar karbon di Indonesia. Berdasarkan kisaran harga transaksi karbon domestik yang berada pada rentang Rp50.000–66.000 per ton CO₂-eq, reduksi emisi yang dihasilkan BGS berpotensi memberikan nilai ekonomi tambahan sekitar Rp84,7–111,8 juta per tahun. Nilai ini belum termasuk dalam perhitungan manfaat ekonomi proyek yang digunakan saat ini. Apabila komponen tersebut diperhitungkan, maka manfaat ekonomi tahunan yang sebelumnya sebesar Rp223,1 juta dapat meningkat menjadi sekitar Rp307,8–334,9 juta per tahun.

Hasil wawancara dengan pengelola menunjukkan bahwa manfaat ekonomi proyek selama ini terutama berasal dari penjualan listrik, pemanfaatan biogas untuk kebutuhan kantin pasar, serta produksi pupuk organik dari digestat. Keberadaan beberapa sumber pendapatan tersebut menjadi salah satu alasan mengapa fasilitas masih dapat beroperasi secara berkelanjutan. Namun demikian, potensi nilai karbon memberikan perspektif baru bahwa manfaat proyek sebenarnya tidak hanya berasal dari produk yang dijual secara langsung, melainkan juga dari jasa lingkungan yang dihasilkan selama proses pengolahan limbah berlangsung. Dalam konteks ini, pengurangan emisi dapat dipandang sebagai produk tambahan yang memiliki nilai ekonomi tersendiri.

Jika manfaat ekonomi dari pengurangan emisi digabungkan dengan pendapatan yang telah diperoleh dari listrik, biogas, dan pupuk organik, keuntungan bersih proyek berpotensi meningkat dari sekitar Rp116 juta menjadi Rp200,7–226,9 juta per tahun. Peningkatan tersebut berimplikasi langsung pada periode pengembalian investasi yang menjadi lebih singkat dibandingkan perhitungan dasar tanpa nilai karbon. Temuan ini memperlihatkan bahwa kelayakan proyek biogas skala komunitas tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menghasilkan energi, tetapi juga oleh kemampuannya menyediakan manfaat lingkungan yang dapat diterjemahkan menjadi nilai ekonomi. Oleh karena itu, semakin berkembangnya mekanisme perdagangan karbon di Indonesia dapat membuka peluang baru bagi proyek-proyek pengolahan limbah organik seperti BGS untuk memperkuat keberlanjutan finansialnya dalam jangka Panjang.^{37,38}

Circular Business Model Canvas (CBMC) Sistem Biogas Pasar Buah

Hasil penyusunan CBMC menunjukkan bahwa Proyek Biogas Gamping–Sleman (BGS) tidak hanya berfungsi sebagai fasilitas pengolahan limbah organik, tetapi juga sebagai mekanisme penciptaan nilai yang menghubungkan berbagai aktor dalam ekosistem pasar tradisional. Berbeda dengan sistem pengelolaan sampah konvensional yang umumnya berakhir pada proses pengumpulan dan pembuangan, BGS mengubah limbah buah menjadi sumber daya yang menghasilkan manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial secara simultan. Dalam konteks ini, limbah tidak lagi dipandang sebagai beban pengelolaan, melainkan sebagai bahan baku utama yang menjadi dasar terbentuknya berbagai aliran nilai di dalam sistem. Struktur hubungan antar komponen bisnis sirkular yang terbentuk pada sistem BGS disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Circular Business Model Canvas (CBMC) Proyek BGS*

Pada aspek key activities, aktivitas utama tidak hanya mencakup pengolahan limbah menjadi biogas, tetapi juga mencakup pengumpulan, pemilahan, pengendalian kualitas substrat, pengoperasian biodigester, pengelolaan digestat, hingga distribusi energi kepada pengguna akhir. Hasil observasi menunjukkan bahwa stabilitas pasokan bahan baku menjadi salah satu faktor penting yang memengaruhi kinerja sistem. Ketersediaan limbah buah tidak selalu konstan sepanjang tahun dan dapat dipengaruhi oleh pola perdagangan pasar maupun karakteristik limbah yang dihasilkan. Pengelola juga mengidentifikasi bahwa peningkatan proporsi limbah buah yang mengandung limonen, seperti jeruk dan kelompok sitrus lainnya, berpotensi mengganggu proses biodigesti apabila jumlahnya terlalu dominan. Temuan ini menunjukkan bahwa pengelolaan bahan baku menjadi aktivitas strategis yang sama pentingnya dengan pengoperasian teknologi itu sendiri.

Pada komponen *key resources*, biodigester, genset 10 kVA, jaringan distribusi listrik internal pasar, serta sumber pasokan limbah organik merupakan aset utama yang menopang keberlangsungan model bisnis. Namun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa sumber daya yang paling penting sebenarnya bukan hanya infrastruktur fisik, melainkan kontinuitas aliran limbah organik yang menjadi fondasi seluruh proses penciptaan nilai. Tanpa pasokan limbah yang memadai, produksi biogas akan menurun sehingga berdampak pada seluruh aliran manfaat yang dihasilkan oleh sistem.

Nilai utama (*value proposition*) yang ditawarkan BGS tidak hanya berupa produksi energi terbarukan dan pupuk organik, tetapi juga pengurangan biaya energi bagi pedagang pasar. Nilai-nilai ini sejalan dengan prinsip co-product pathways yang dikemukakan Jameel et al.³⁹ dan Katuwal dan Bohara⁴⁰ Biogas yang dihasilkan dikonversi menjadi listrik untuk mendukung kebutuhan penerangan sekitar 155 kios. Meskipun pedagang tetap membeli token listrik melalui koperasi, keberadaan listrik yang dihasilkan dari biogas membantu menekan biaya energi yang harus dibayarkan dibandingkan apabila seluruh kebutuhan listrik dipasok dari jaringan eksternal. Dengan demikian, manfaat yang diterima pengguna tidak hanya berupa akses terhadap energi, tetapi juga penghematan biaya operasional yang dapat dirasakan secara langsung. menegaskan bahwa sistem AD mampu menghasilkan manfaat ganda melalui produksi energi dan pemulihan nutrisi. Penguatan nilai lingkungan ini juga konsisten dengan konsep *localized circularity* dalam ekosistem metabolisme perkotaan.^{41,42}

Selain manfaat energi, BGS juga menghasilkan digestat yang menjadi sumber nilai tambahan dalam sistem. Digestat dipasarkan dengan harga sekitar Rp5.000 per liter kepada petani sekitar maupun komunitas urban farming. Keberadaan pasar untuk digestat menunjukkan bahwa produk samping biodigester memiliki nilai ekonomi yang dapat dimanfaatkan di luar sektor persampahan. Namun demikian, hasil wawancara menunjukkan bahwa permintaan digestat tidak selalu stabil. Pada periode tertentu seluruh digestat dapat terserap oleh pasar, sementara pada kondisi lain sebagian produk harus dimanfaatkan secara internal karena belum terdapat pembeli. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pengembangan pasar untuk produk hasil pemulihan sumber daya masih menjadi salah satu tantangan penting dalam penguatan model bisnis sirkular berbasis limbah organik.

Dari perspektif customer segments, BGS melayani beberapa kelompok pengguna yang berbeda. Pedagang pasar memperoleh manfaat melalui pengurangan biaya listrik dan perbaikan kondisi lingkungan pasar. Di sisi lain, petani lokal dan komunitas urban farming menjadi pengguna utama digestat sebagai produk hasil pemulihan nutrisi. Keberadaan lebih dari satu segmen pelanggan memberikan keuntungan karena sumber pendapatan sistem tidak bergantung pada satu jenis produk saja. Diversifikasi ini menjadi penting untuk meningkatkan ketahanan model bisnis terhadap perubahan kondisi pasar maupun fluktuasi permintaan.

Pada aspek channels dan customer relationships, distribusi nilai dilakukan melalui mekanisme yang relatif sederhana dan berbasis lokal. Listrik disalurkan melalui jaringan internal pasar yang dikelola koperasi, sedangkan digestat dipasarkan secara langsung kepada pengguna di wilayah sekitar. Pola distribusi seperti ini memperlihatkan bahwa sebagian besar manfaat yang dihasilkan sistem tetap berputar di dalam lingkungan pasar dan masyarakat lokal. Dengan demikian, nilai yang tercipta dari limbah buah tidak keluar dari kawasan pasar, tetapi kembali dimanfaatkan oleh aktor-aktor yang terlibat dalam sistem tersebut. Analisis literatur menunjukkan bahwa diversifikasi pendapatan seperti ini sangat menentukan kelayakan finansial proyek biogas komunitas, terutama ketika harga energi komersial tinggi atau fluktuatif.^{43,44}

Struktur pendapatan (*revenue streams*) BGS menunjukkan adanya kombinasi beberapa sumber nilai yang saling melengkapi, yaitu penjualan listrik, penjualan digestat, serta manfaat tidak langsung berupa pengurangan beban pengelolaan limbah. Pola ini memberikan fleksibilitas yang lebih besar dibandingkan model bisnis yang hanya bergantung pada satu produk utama. Selain itu, tingginya potensi pengurangan emisi yang telah diidentifikasi pada penelitian ini membuka peluang pengembangan nilai ekonomi tambahan melalui mekanisme kredit karbon apabila regulasi dan skema pasar yang mendukung semakin berkembang di masa mendatang.^{45,46}

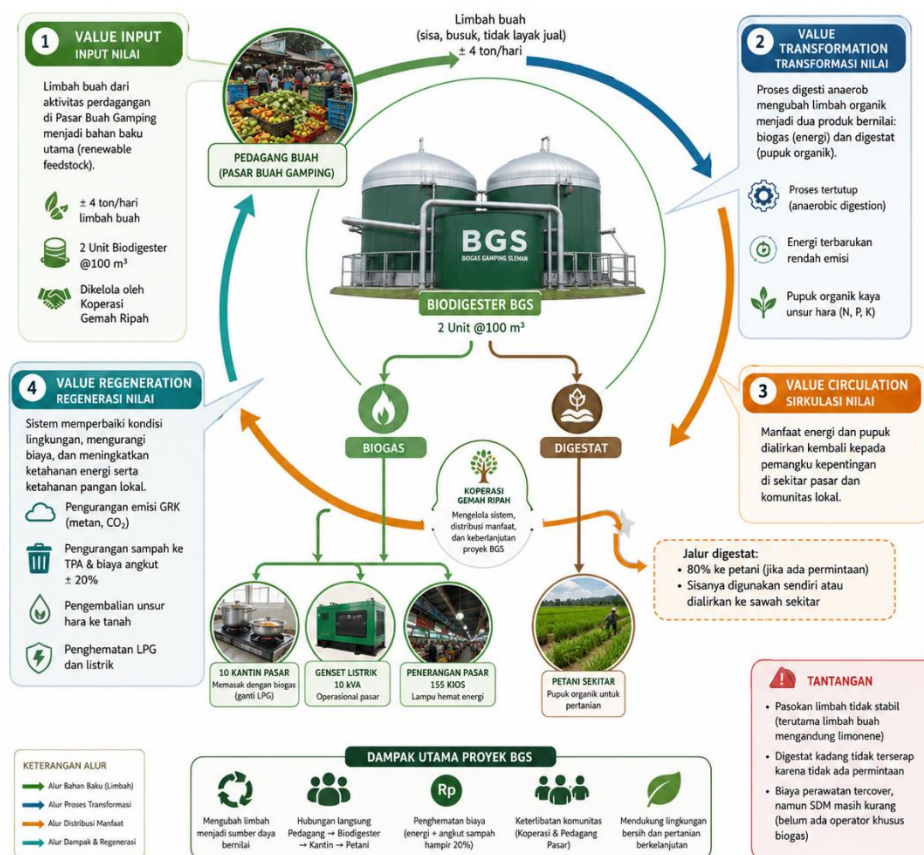
Secara keseluruhan, CBMC BGS memperlihatkan bahwa prinsip ekonomi sirkular tidak hanya tercermin pada proses daur ulang material, tetapi juga pada cara nilai diciptakan, didistribusikan, dan dipertahankan di dalam sistem. Limbah buah yang semula hanya menimbulkan biaya pengelolaan berhasil diubah menjadi sumber energi dan produk berbasis nutrisi yang memberikan manfaat bagi berbagai kelompok pengguna. Meskipun masih menghadapi beberapa tantangan, seperti fluktuasi pasokan limbah dan ketidakstabilan permintaan digestat, pengalaman BGS menunjukkan bahwa integrasi antara pengelolaan limbah, produksi energi, dan pemanfaatan hasil samping dapat membentuk model bisnis sirkular yang operasional, adaptif, dan relevan bagi pasar tradisional di Indonesia. Temuan ini konsisten dengan perkembangan penelitian terbaru mengenai circular bioeconomy, yang menekankan integrasi energi terbarukan dan pemanfaatan sumber daya organik sebagai pendorong transformasi sistemik menuju keberlanjutan.^{47,48}

Circular Value Loop (CVL) Sistem Biogas Pasar Buah

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai yang dihasilkan oleh Sistem BGS tidak hanya berasal dari produksi biogas, melainkan dari keterhubungan berbagai aktivitas yang sebelumnya berjalan terpisah di lingkungan pasar. Sebelum biodigester beroperasi, limbah buah umumnya dipandang sebagai residu yang harus segera dikeluarkan dari area pasar karena berpotensi menimbulkan bau, menarik vektor penyakit, serta

meningkatkan biaya pengelolaan sampah. Setelah sistem biogas diterapkan, limbah yang sama justru menjadi sumber daya utama yang menopang produksi energi dan berbagai manfaat turunan lainnya. Perubahan fungsi limbah dari beban pengelolaan menjadi sumber daya produktif ini mencerminkan prinsip resource valorization, yaitu upaya meningkatkan nilai guna material organik yang sebelumnya tidak dimanfaatkan secara optimal.^{7,49} Dalam kerangka ekonomi sirkular, limbah buah tidak lagi diposisikan sebagai akhir dari suatu aktivitas ekonomi, tetapi sebagai renewable feedstock yang dapat terus dimanfaatkan dalam siklus produksi berikutnya.⁴⁹

Kondisi tersebut sangat relevan dengan karakteristik Pasar Buah Gamping yang menghasilkan limbah organik dalam jumlah relatif stabil setiap hari. Dengan timbulan limbah sekitar 4 ton per hari, ketersediaan bahan baku bagi biodigester dapat dipertahankan secara berkelanjutan. Keberadaan dua unit biodigester berkapasitas masing-masing 100 m³ memungkinkan sebagian besar limbah tersebut tidak langsung keluar dari sistem, tetapi terlebih dahulu mengalami proses konversi menjadi produk yang memiliki nilai guna baru. Temuan ini menunjukkan bahwa pasar tradisional tidak hanya berperan sebagai lokasi timbulan sampah, tetapi juga dapat berfungsi sebagai sumber daya terbarukan yang mampu mendukung pembentukan sistem sirkular berbasis komunitas.^{2,50}



Gambar 4. Circular Value Loop (CVL) Proyek BGS

Tahap berikutnya dalam *Circular Value Loop* sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 4, terjadi pada proses transformasi nilai (*value transformation*). Limbah buah yang terkumpul mengalami serangkaian tahapan mulai dari pencacahan, pencampuran, hingga digesti anaerob untuk menghasilkan biogas dan digestat. Proses ini menghasilkan dua keluaran yang berbeda namun saling melengkapi, yaitu energi dan produk berbasis nutrisi. Pola tersebut dikenal sebagai co-product pathway, dimana satu jenis bahan baku mampu menghasilkan lebih dari satu bentuk nilai secara bersamaan.^{51,52} Pada BGS, biogas berfungsi sebagai sumber energi terbarukan, sedangkan digestat menjadi media pemulihan unsur hara yang sebelumnya terkandung dalam limbah buah.

Nilai yang dihasilkan kemudian memasuki tahap sirkulasi (*value circulation*), yaitu ketika produk hasil biodigesti dimanfaatkan kembali oleh berbagai aktor yang terlibat dalam sistem. Biogas yang diproduksi digunakan untuk kebutuhan memasak pada kantin pasar, pengoperasian genset berkapasitas 10 kVA, serta mendukung penyediaan listrik bagi sekitar 155 kios. Kondisi ini menciptakan hubungan timbal balik yang menarik. Pedagang menghasilkan limbah organik melalui aktivitas perdagangan, limbah tersebut diolah menjadi energi, dan energi yang dihasilkan kembali mendukung aktivitas ekonomi pedagang di pasar yang sama. Dengan

demikian, manfaat energi tidak keluar dari sistem, tetapi berputar kembali kepada pihak yang secara tidak langsung berkontribusi terhadap pembentukan bahan bakunya.

Pada saat yang sama, digestat yang dihasilkan biodigester turut membentuk siklus nilai yang lebih luas. Berdasarkan hasil wawancara dengan pengelola, sekitar 80% digestat dapat dimanfaatkan oleh petani maupun komunitas urban farming ketika terdapat permintaan, sedangkan sisanya digunakan untuk kebutuhan internal atau dialirkan ke lahan di sekitar lokasi instalasi. Pemanfaatan digestat ini mencerminkan terbentuknya circular nutrient loop, dimana unsur hara yang sebelumnya terkandung dalam limbah buah dikembalikan ke sistem produksi pertanian melalui aplikasi pupuk organik.⁵³ Mekanisme tersebut tidak hanya meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya, tetapi juga berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap pupuk sintetis yang selama ini mendominasi sektor pertanian. Dengan demikian, manfaat yang dihasilkan BGS tidak berhenti pada sektor energi, tetapi juga meluas ke sektor pertanian lokal melalui pemulihan nutrisi yang berkelanjutan.

Jika ditinjau dari perspektif para pemangku kepentingan, kekuatan utama BGS terletak pada hubungan antaraktor yang terbentuk di dalam sistem. Pedagang buah menyediakan bahan baku berupa limbah organik, Koperasi Gemah Ripah bertanggung jawab terhadap pengelolaan dan operasional biodigester, pelaku usaha kantin memanfaatkan energi yang dihasilkan, sedangkan petani dan komunitas urban farming menjadi pengguna digestat. Setiap aktor memperoleh manfaat yang berbeda, namun saling bergantung satu sama lain dalam menjaga keberlangsungan sistem. Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan ekonomi sirkular tidak hanya ditentukan oleh kinerja teknologi, tetapi juga oleh kemampuan membangun jejaring pertukaran nilai yang mampu menghubungkan berbagai sektor dalam satu ekosistem yang terintegrasi.

Meskipun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa CVL pada BGS belum sepenuhnya terbentuk secara ideal. Beberapa tantangan masih ditemukan dalam praktik operasional sehari-hari. Salah satu tantangan utama adalah fluktuasi komposisi limbah buah yang masuk ke biodigester. Berdasarkan informasi dari pengelola, peningkatan proporsi limbah buah yang mengandung limonene, seperti kelompok buah sitrus, dapat memengaruhi proses digesti anaerob apabila jumlahnya terlalu dominan. Selain itu, pemanfaatan digestat masih sangat dipengaruhi oleh permintaan pengguna. Ketika permintaan menurun, sebagian digestat harus disimpan atau dimanfaatkan secara terbatas di area sekitar instalasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberhasilan ekonomi sirkular tidak hanya bergantung pada kemampuan mengolah limbah, tetapi juga pada kemampuan menciptakan dan mempertahankan pasar bagi produk hasil pemulihan sumber daya.

Tantangan lain yang tidak kalah penting adalah aspek kelembagaan dan sumber daya manusia. Walaupun sistem biodigester telah beroperasi dengan baik dan genset relatif dapat diandalkan, pengelolaan fasilitas masih menghadapi keterbatasan tenaga khusus yang secara penuh bertanggung jawab terhadap operasional instalasi. Temuan ini mengindikasikan bahwa keberlanjutan sistem tidak hanya ditentukan oleh keberadaan teknologi, tetapi juga oleh kapasitas organisasi yang mendukung pengelolaannya. Dalam jangka panjang, penguatan kapasitas operator dan kelembagaan menjadi faktor penting untuk menjaga kualitas operasional serta memastikan manfaat yang dihasilkan dapat terus berlanjut.

Tahap terakhir dalam *Circular Value Loop* adalah regenerasi nilai (*value regeneration*). Pada tahap ini, manfaat yang dihasilkan sistem tidak hanya dirasakan oleh pengguna langsung, tetapi juga memberikan dampak yang lebih luas terhadap lingkungan dan keberlanjutan kawasan. Pengurangan emisi gas rumah kaca yang terjadi melalui pencegahan pembusukan terbuka serta substitusi energi fosil oleh biogas memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi perubahan iklim.¹⁰ Selain itu, pemanfaatan digestat membantu menutup siklus nutrisi sekaligus mengurangi potensi pencemaran yang dapat terjadi apabila limbah organik tidak dikelola dengan baik.²⁹ Sejumlah penelitian juga menunjukkan bahwa model sirkular berbasis komunitas mampu memperkuat ketahanan energi dan pangan lokal melalui pemanfaatan sumber daya yang tersedia di wilayahnya sendiri.¹⁶

Berdasarkan keseluruhan temuan tersebut, penelitian ini berpendapat bahwa Sistem BGS lebih tepat dipahami sebagai suatu ekosistem sirkular berbasis pasar daripada sekadar fasilitas pengolahan limbah organik. Nilai yang dihasilkan sistem tidak terletak pada biogas semata, melainkan pada kemampuannya menghubungkan pengelolaan limbah, produksi energi, pemulihan nutrisi, dan aktivitas ekonomi lokal dalam satu siklus yang saling mendukung. Pola ini menunjukkan bahwa pasar tradisional tidak hanya dapat berfungsi sebagai pusat perdagangan, tetapi juga sebagai pusat sirkulasi sumber daya yang menghasilkan manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial secara simultan. Oleh karena itu, pengalaman BGS memberikan pelajaran penting bahwa keberhasilan ekonomi sirkular pada tingkat lokal lebih banyak ditentukan oleh kemampuan membangun hubungan antaraktor dan mempertahankan aliran nilai di dalam sistem dibandingkan sekadar kemampuan mengoperasikan teknologi pengolahan limbah.

SIMPULAN

Studi ini memperlihatkan bahwa limbah buah dari pasar tradisional tidak selalu berakhir sebagai sampah yang harus dibuang ke tempat pembuangan akhir. Pengalaman Proyek BGS menunjukkan bahwa limbah yang setiap hari dihasilkan dari aktivitas perdagangan dapat diperlakukan sebagai sumber daya yang masih memiliki nilai apabila dikelola melalui pendekatan yang tepat. Melalui proses digesti anaerobik, limbah buah berhasil dikonversi menjadi biogas dan digestat yang kemudian dimanfaatkan kembali untuk mendukung aktivitas

ekonomi di sekitar pasar. Temuan ini menunjukkan adanya pergeseran peran limbah, dari sesuatu yang sebelumnya dipandang sebagai beban pengelolaan menjadi bagian penting dalam siklus pemanfaatan sumber daya.

Hasil analisis mengindikasikan bahwa manfaat yang dihasilkan BGS tidak hanya muncul pada satu aspek tertentu. Produksi biogas mampu mendukung kebutuhan energi pasar melalui penyediaan listrik bagi kios dan pemanfaatan energi untuk kegiatan operasional lainnya. Pada saat yang sama, digestat yang dihasilkan masih dapat dimanfaatkan oleh petani dan komunitas urban farming sebagai pupuk organik. Dengan demikian, satu aliran limbah menghasilkan dua bentuk nilai yang berbeda, yaitu energi dan nutrisi. Kondisi ini memperlihatkan bahwa pemulihan sumber daya dari limbah organik tidak harus berorientasi pada satu produk akhir, tetapi dapat menghasilkan berbagai manfaat yang saling melengkapi.

Dari sisi lingkungan, keberadaan biodigester berkontribusi terhadap berkurangnya akumulasi limbah organik di kawasan pasar serta menekan potensi emisi yang umumnya muncul dari proses pembusukan terbuka. Temuan lapangan juga menunjukkan adanya perubahan kondisi lingkungan yang dirasakan secara langsung, seperti berkurangnya bau dan menurunnya keberadaan lalat di area pengelolaan sampah. Meskipun dampak tersebut tidak seluruhnya dapat dinyatakan dalam satuan ekonomi, keberadaannya menjadi bagian penting dari manfaat yang dihasilkan sistem karena berkaitan dengan kualitas lingkungan pasar dan kenyamanan pengguna.

Hal yang menarik dari penelitian ini adalah bahwa keberhasilan BGS tidak semata-mata ditentukan oleh keberadaan teknologi biodigester. Sistem dapat terus beroperasi karena adanya hubungan yang saling mendukung antara pedagang pasar, pengelola, pengguna energi, dan pemanfaat digestat. Keterhubungan antaraktor tersebut memungkinkan nilai yang dihasilkan dari limbah terus berputar di tingkat lokal. Oleh karena itu, keberhasilan ekonomi sirkular pada kasus BGS tampaknya lebih banyak dipengaruhi oleh kemampuan membangun dan mempertahankan jejaring pemanfaatan sumber daya dibandingkan oleh aspek teknologi semata.

Meskipun demikian, beberapa tantangan masih perlu diperhatikan untuk mendukung keberlanjutan sistem dalam jangka panjang. Fluktuasi karakteristik limbah, ketergantungan terhadap permintaan digestat, serta periode pengembalian investasi yang relatif panjang menunjukkan bahwa penguatan aspek bisnis dan kelembagaan masih diperlukan. Pengembangan pasar digestat, peningkatan nilai tambah produk hasil biodigester, dan penguatan kapasitas pengelola menjadi beberapa langkah yang berpotensi meningkatkan kinerja sistem di masa mendatang.

Secara keseluruhan, pengalaman BGS memberikan gambaran bahwa pasar tradisional memiliki peluang untuk berperan lebih dari sekadar tempat berlangsungnya aktivitas perdagangan. Ketika limbah dipandang sebagai sumber daya dan dikelola dalam suatu sistem yang terintegrasi, pasar dapat menjadi ruang terjadinya sirkulasi energi, nutrisi, dan nilai ekonomi secara bersamaan. Temuan ini memperlihatkan bahwa penerapan ekonomi sirkular pada skala lokal bukanlah konsep yang bersifat abstrak, melainkan sesuatu yang dapat dijalankan dan memberikan manfaat nyata apabila didukung oleh teknologi yang sesuai, kelembagaan yang memadai, dan partisipasi para pemangku kepentingan yang terlibat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Wiharja, Suherman, Syafrudin, Kholiq MA, Pratama RA, Robbani MH, et al. Research on the matching relationship of municipal solid waste management and alternative fuel in Indonesia's cement industry. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2025 Jun 1;11. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101098>
2. Prasanna Kumar DJ, Mishra RK, Chinnam S, Binnal P, Dwivedi N. A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends. Biotechnology Notes. KeAi Communications Co.; 2024. p. 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.02.001>
3. Dincă MN, Ferdeş M, Zăbavă B Ștefania, Ionescu M, Moiceanu G, Paraschiv G. Effective Valorization of Anaerobic Digestate—A Sustainable Approach to Circular Economy. Applied Sciences (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2025. <https://doi.org/10.3390/app15168939>
4. Slorach PC, Jeswani HK, Cuéllar-Franca R, Azapagic A. Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste. J Environ Manage. 2019 Apr 15;236:798–814. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.001>
5. Ankathi SK, Chaudhari US, Handler RM, Shonnard DR. Sustainability of Biogas Production from Anaerobic Digestion of Food Waste and Animal Manure. Applied Microbiology. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2024. p. 418–38. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4010029>
6. Marendra F, Pramudikto DA, Rahmada A, Rimbawan HJ, Cahyono RB, Ariyanto T. Biogas production for electricity from fruit waste: A case study of Gemah Ripah biogas plant, Yogyakarta. In: IOP Conference

- Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing; 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022058>
7. Rahmada A, Marendra F, Rimbawan H, Wulandari C, Putri AE, Mustofa A, et al. Zero Waste Concept in Fruit Waste Anaerobic Digester: Case Study of Biogas Plant Gamping, Yogyakarta. *Advances in Engineering Research*. 2021;202:246–51. <https://doi.org/10.2991/aer.k.210603.044>
 8. Rahmadani DP, Rahmada A, Marendra F, Rimbawan HJ, Cahyono RB, Ariyanto T. Biogas Purification Using Chitosan-Impregnated Porous Carbon. 2021. <https://doi.org/10.2991/aer.k.210603.051>
 9. Marendra F, Sarnes R, Ramadhania Putri Maresi S, Puspahita A, Dwi Sutarni Y, Mustafawi Muhammadi F. Pengaruh Kadar Senyawa Kapsaisinoid terhadap Produksi Biogas dalam Proses Anaerobic Digestion Limbah Sayur. *Warta Akab*. 2025;49(1):5–14. <https://doi.org/10.55075/wa.v49i1.256>
 10. Marendra F, Rahmada A, Prasetya A, Cahyono RB, Ariyanto T. Kajian Dampak Lingkungan pada Sistem Produksi Listrik dari Limbah Buah Menggunakan Life Cycle Assessment. *Jurnal Rekayasa Proses*. 2018 Dec 31;12(2):27. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.36425>
 11. Ijeoma MW, Chukwu BN, Yakubu RO, Chen H, Carbajales-Dale M. A comparative and prospective life cycle assessment of agricultural fruit wastes disposal: A case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02499-8>
 12. Pandiyaswargo AH, Gamalalage PJD, Liu C, Knaus M, Onoda H, Mahichi F, et al. Challenges and an implementation framework for sustainable municipal organic waste management using biogas technology in Emerging Asian Countries. *Sustainability (Switzerland)*. MDPI; 2019. <https://doi.org/10.3390/su11226331>
 13. Taffuri A, Sciullo A, Diemer A, Nedelciu CE. Integrating circular bioeconomy and urban dynamics to define an innovative management of bio-waste: The study case of turin. *Sustainability (Switzerland)*. 2021 Jun 1;13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116224>
 14. Olsson E. Conceptualizing circularity in urban food systems: A scoping review. *Glob Food Sec*. 2025 Oct;100893. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2025.100893>
 15. Bautista Angeli JR, Morales A, LeFloc'h T, Lakel A, Andres Y. Anaerobic digestion and integration at urban scale: Feedback and comparative case study. *Energy Sustain Soc*. 2020;8(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0170-3>
 16. Chen L, Cong RG, Shu B, Mi ZF. A sustainable biogas model in China: The case study of Beijing Deqingyuan biogas project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2017. p. 773–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.027>
 17. Liu L, Qu J, Li X, Liao Q, Niu Y. Review of material flow analysis and its application under carbon neutralization target: a bibliometric perspective. *Carbon Footprints*. OAE Publishing Inc.; 2024. <https://doi.org/10.20517/cf.2024.16>
 18. Choi HJ, Hwang D, Yoon YS, Jeon TW, Rhee SW. Applying Material Flow Analysis for Sustainable Waste Management of Single-Use Plastics and Packaging Materials in the Republic of Korea. *Sustainability (Switzerland)*. 2024 Aug 1;16(16). <https://doi.org/10.3390/su16166926>
 19. Haupt M, Vadenbo C, Hellweg S. Do We Have the Right Performance Indicators for the Circular Economy?: Insight into the Swiss Waste Management System. *J Ind Ecol*. 2017 Jun 1;21(3):615–27. <https://doi.org/10.1111/jiec.12506>
 20. HBRUNNER P, RECHBERGER H. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. 1946.
 21. Hanley N, Barbier E. *Pricing Nature: Cost-benefit Analysis and Environmental Policy*. Edward Elgar Publishing; 2009. 1–360 p.
 22. Pearce DW, Turner RK. *Economics of natural resources and the environment*. The Johns Hopkins University Press; 1990.
 23. Geissdoerfer M, Vladimirova D, Evans S. Sustainable business model innovation: A review. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd; 2018. p. 401–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.240>
 24. Lüdeke-Freund F, Gold S, Bocken NMP. A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. *Journal of Industrial Ecology*. Blackwell Publishing; 2019. p. 36–61. <https://doi.org/10.1111/jiec.12763>

25. Manninen K, Koskela S, Antikainen R, Bocken N, Dahlbo H, Aminoff A. Do circular economy business models capture intended environmental value propositions? *J Clean Prod.* 2018 Jan 10;171:413–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.003>
26. Kirchherr J, Reike D, Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling.* Elsevier B.V.; 2017. p. 221–32. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
27. Al-Zoubi AI, Alkhamis TM, Alzoubi HA. Optimized biogas production from poultry manure with respect to pH, C/N, and temperature. *Results in Engineering.* 2024 Jun 1;22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102040>
28. Li Z, You Z, Zhang L, Chen H. Effect of total solids content on anaerobic digestion of waste activated sludge enhanced by high-temperature thermal hydrolysis. *J Environ Manage.* 2024 May 1;359. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120980>
29. Ariyanto T, Cahyono RB, Vente A, Mattheij S, Millati R, Sarto, et al. Utilization of fruit waste as biogas plant feed and its superiority compared to landfill. *International Journal of Technology.* 2017 Dec 27;8(8):1385–92. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i8.739>
30. Pambudi NF, Simatupang TM, Samarakoon SMSMK, Mulyono NB, Ratnayake RMC, Okdinawati L. Factors and future scenarios for green transition in circular waste management business model development. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity.* 2025 Mar 1;11(1). <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100504>
31. Hanna Lintong E, Agnes Pertiwi Juita Pangkey D, Runtuwene HC. Circular Economy-based Waste Management in Tomohon City: Toward A Green Economy Through Innovative and Participatory Approaches. *Pendidikan Dan Humaniora.* 2025;9(4). <https://doi.org/10.36526/santhet.v9i4.5845>
32. Permatasari R, Pratiwi I, Hadinata F, Yusuf AA, Ammarullah MI. Assessment of greenhouse gas (GHG) emissions in Indonesia using the first order decay (FOD) model: implications of waste bioavailability, biodegradability, and bioactivity. *Environmental Pollutants and Bioavailability.* 2025;37(1). <https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2539875>
33. Citrasari N, Rachman I, Matsumoto T. Methane Emissions from Indonesian Landfills: Site Conditions, Scientific Evidence, and Environmental Risks. *International Journal Of Scientific Advances.* 2025;6(3). <https://doi.org/10.51542/ijscia.v6i3.7>
34. dos Muchangos LS, Tokai A. Greenhouse gas emission analysis of upgrading from an open dump to a semi-aerobic landfill in Mozambique – the case of Hulene dumpsite. *Sci Afr.* 2020 Nov 1;10. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00638>
35. Adnane I, Taoumi H, Lahrech K, Fertahi SE dîn, Ghodbane M. From waste to resource: biogas and digestate valorization strategies for sustainable energy and agriculture. *Biomass and Bioenergy.* Elsevier Ltd; 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108006>
36. Yoshizaki T, Shirai Y, Hassan MA, Baharuddin AS, Raja Abdullah NM, Sulaiman A, et al. Improved economic viability of integrated biogas energy and compost production for sustainable palm oil mill management. *J Clean Prod.* 2013;44:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.007>
37. Silaen M, Taylor R, Bößner S, Anger-Kraavi A, Chewpreecha U, Badinotti A, et al. Lessons from Bali for small-scale biogas development in Indonesia. *Environ Innov Soc Transit.* 2020 Jun 1;35:445–59. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.09.003>
38. Afridi ZUR, Ullah K, Mustafa MF, Saleem H, Shaker B, Ashraf N, et al. Biogas as sustainable approach for social uplift in South East Asian Region. *Energy Reports.* 2023 Nov 1;10:4808–18. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.11.037>
39. Jameel MK, Mustafa MA, Ahmed HS, Mohammed A jassim, Ghazy H, Shakir MN, et al. Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry.* Elsevier B.V.; 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101549>
40. Katuwal H, Bohara AK. Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2009. p. 2668–74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.002>
41. Bourdin S, Galliano D, Gonçalves A. Circularities in territories: opportunities & challenges. *European Planning Studies.* Routledge; 2022. p. 1183–91. <https://doi.org/10.1080/09654313.2021.1973174>

42. Surekha CK, Kini PG, Hariharan AN. Spatial circularity in sustainable urban development: a scoping review of the spatial dimension of circular economy. *City, Territory and Architecture*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2025. <https://doi.org/10.1186/s40410-025-00279-3>
43. González R, García-Cascallana J, Gutiérrez-Bravo J, Gómez X. Decentralized Biogas Production in Urban Areas: Studying the Feasibility of Using High-Efficiency Engines. *Eng*. 2023 Sep 1;4(3):2204–25. <https://doi.org/10.3390/eng4030127>
44. Angouria-Tsorochidou E, Teigiserova DA, Thomsen M. Environmental and economic assessment of decentralized bioenergy and biorefinery networks treating urban biowaste. *Resour Conserv Recycl*. 2022 Jan 1;176. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105898>
45. Kumawat R, Gidwani L, Rana KB. Comparative analysis of life cycle assessment of biogas-powered and coal-powered power plant for optimized environmental operation. *Heliyon*. 2024 Oct 30;10(20). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39155>
46. Rasheed R, Tahir F, Yasar A, Sharif F, Tabinda AB, Ahmad SR, et al. Environmental life cycle analysis of a modern commercial-scale fibreglass composite-based biogas scrubbing system. *Renew Energy*. 2022 Feb 1;185:1261–71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.119>
47. Parapat RY, Sudaryanto BA, Firdaus MZ, Hidayat WNR, Kurniawan R, Yuono Y, et al. Empowering Rural Sustainability: Advancing Household-Scale Biogas Reactor Technology with Fiber Reinforced Plastic (FRP) in Suntenjaya Village, Lembang. *REKA ELKOMIKA: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*. 2024 Jan 31;5(1):67–77. <https://doi.org/10.26760/rekaelkomika.v5i1.67-77>
48. St Flour PO, Bokhoree C. Sustainability Assessment Methodologies: Implications and Challenges for SIDS. *Ecologies*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2021. p. 285–304. <https://doi.org/10.3390/ecologies2030016>
49. Marendra F. Green Energy Circulation |The Role of anaerobic digestion in a circular economy. first. Yogyakarta: Penamuda Media; 2025.
50. Budiyo, Manthia F, Amalin N, Hawali Abdul Matin H, Sumardiono S. Production of Biogas from Organic Fruit Waste in Anaerobic Digester using Ruminant as the Inoculum. In: *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences; 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815603053>
51. Cesaro A. The valorization of the anaerobic digestate from the organic fractions of municipal solid waste: Challenges and perspectives. *Journal of Environmental Management*. Academic Press; 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111742>
52. Czekala W, Jasiński T, Grzelak M, Witaszek K, Dach J. Biogas Plant Operation: Digestate as the Valuable Product. *Energies*. MDPI; 2022. <https://doi.org/10.3390/en15218275>
53. Chojnacka K, Moustakas K. Anaerobic digestate management for carbon neutrality and fertilizer use: A review of current practices and future opportunities. *Biomass Bioenergy*. 2024 Jan 1;180. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106991>