

Studi Sosial Ekonomi Pengelolaan Limbah Sapi Potong sebagai Energi Terbarukan dan Pupuk Organik dalam Kerangka *Circular Economy*

Socio-Economic Study on Cattle Waste Management for Renewable Energy and Organic Fertilizer within the Circular Economy Framework

I Putu Gede Didik Widiarta^{1✉}, Cori Qamara², Hamdi Mayulu³

¹Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

²Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

³Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

✉Corresponding author: didikwidiarta9@gmail.com

Abstrak

Penelitian bertujuan mengkaji optimalisasi pengelolaan limbah sapi potong melalui penerapan prinsip ekonomi sirkular untuk menghasilkan energi terbarukan dan pupuk organik sebagai kontribusi terhadap keberlanjutan industri peternakan. Kotoran sapi diolah menggunakan anaerobic digestion (AD) untuk menghasilkan biogas dan digesta yang dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Penelitian mengadopsi pendekatan metode campuran, yang mengintegrasikan analisis kuantitatif dan kualitatif, dengan fokus pada dampak sosial dan ekonomi dari pengelolaan limbah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi AD dapat mengurangi emisi gas rumah kaca, khususnya metana, sebesar 80% dan menyediakan sumber energi alternatif yang signifikan bagi peternak. Pupuk organik yang dihasilkan dari residu AD terbukti meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan hasil pertanian. Penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam pengelolaan limbah memberikan manfaat lingkungan yang signifikan, meningkatkan kesejahteraan ekonomi peternak dan keberlanjutan sektor peternakan secara keseluruhan.

Abstract

The research aims to examine the optimization of beef cattle waste management through the application of circular economy principles to produce renewable energy and organic fertilizers as a contribution to the sustainability of the livestock industry. Cow dung is processed using anaerobic digestion (AD) to produce biogas and digesta that are used as organic fertilizers. The research adopts a mixed-methods approach, which integrates quantitative and qualitative analysis, with a focus on the social and economic impacts of waste management. The results show that AD technology can reduce greenhouse gas emissions, especially methane, by 80% and provide a significant alternative energy source for farmers. Organic fertilizers produced from AD residues have been proven to increase soil fertility, improve soil structure, and increase agricultural yields. The application of circular economy principles in waste management provides significant environmental benefits, improving the economic welfare of farmers and the sustainability of the livestock sector as a whole.

This is an open-access article under the CC-BY-SA license.



Copyright © 2025 I Putu Gede Didik Widiarta, Cori Qamara, Hamdi Mayulu.

Article history

Received 2025-01-10

Accepted 2025-03-15

Published 2025-04-30

Kata kunci

Ekonomi Sirkular;
Energi Terbarukan;
Limbah Ternak;
Pupuk Organik;
Keberlanjutan.

Keywords

Circular Economy;
Renewable Energy;
Livestock Waste;
Organic Fertilizer;
Sustainability.

1. Pendahuluan

Ekspansi populasi global yang pesat dan meningkatnya permintaan akan protein hewani dalam beberapa tahun terakhir menyebabkan lonjakan produksi daging, terutama daging sapi. Konsumsi daging sapi berdasarkan data dari Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO, 2021) diproyeksikan akan terus meningkat hingga 2030, seiring dengan peningkatan pendapatan dan urbanisasi di negara berkembang. Daging sapi merupakan sumber protein berkualitas tinggi, namun produksinya berdampak negatif terhadap lingkungan, seperti emisi gas rumah kaca (GRK), pencemaran tanah dan air, serta hilangnya keanekaragaman hayati, sehingga penerapan praktik berkelanjutan dalam industri peternakan menjadi sangat penting. Penerapan prinsip ekonomi sirkular merupakan solusi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah tersebut. Ekonomi sirkular berfokus pada pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan dengan meminimalkan limbah. Limbah yang dihasilkan dalam peternakan sapi potong terutama kotoran berpotensi dimanfaatkan untuk menghasilkan energi terbarukan (melalui proses biogas) dan pupuk organik berkualitas tinggi (Geissdoerfer *et al.*, 2018).

Proses konversi kotoran sapi dilakukan melalui teknologi pencernaan anaerobik (AD), yang memanfaatkan mikroorganisme untuk memecah bahan organik tanpa oksigen. Teknologi tersebut menghasilkan biogas yang terdiri dari metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), serta digesta berupa residu padat yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik. García *et al.* (2021) mengungkapkan bahwa teknologi biogas dapat mengurangi emisi GRK, khususnya metana, hingga 80%. Biogas yang dihasilkan dapat digunakan sebagai sumber energi untuk pemanasan, memasak, atau pembangkit listrik. Penggunaan pupuk organik yang dihasilkan dari digesta pengolahan biogas memberikan manfaat signifikan bagi pertanian, seperti meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air. Manfaat tersebut sangat relevan dalam menghadapi perubahan iklim, yang semakin menuntut keberlanjutan produksi pertanian (Müller *et al.*, 2022) dan penggunaan pupuk organik mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia yang berbahaya bagi lingkungan.

Penerapan teknologi pencernaan anaerobik menghadapi sejumlah tantangan, seperti biaya investasi awal yang tinggi dan keterbatasan pengetahuan teknis di kalangan peternak menjadi hambatan utama (Mekonnen *et al.*, 2021). Berbasis laporan Program Lingkungan PBB (UNEP, 2020), banyak peternak di negara berkembang yang kesulitan mendapatkan modal untuk membangun dan mengoperasikan fasilitas pengolahan limbah. Hambatan lain yang dihadapi peternakan dalam menerapkan teknologi pencernaan anaerobik adalah kurangnya dukungan kebijakan dan insentif dari pemerintah, oleh karenanya dibutuhkan pendekatan holistik yang melibatkan akademisi, pelatihan, serta dukungan keuangan untuk mempercepat adopsi teknologi (Marroun *et al.*, 2020).

Kolaborasi antara sektor publik dan swasta sangat penting dalam mendorong adopsi teknologi pencernaan anaerobik. Kerja sama antara pemerintah, lembaga penelitian, dan sektor swasta dapat menciptakan lingkungan yang kondusif untuk inovasi dalam teknologi berkelanjutan. Dukungan teknis dan finansial dari pemerintah dapat mempercepat transisi menuju praktik pengelolaan limbah yang ramah lingkungan (García *et al.*, 2021) dan diharapkan dapat mengurangi dampak lingkungan yang signifikan, meningkatkan keberlanjutan industri peternakan, dan memberikan manfaat ekonomi bagi peternak. Penelitian bertujuan mengeksplorasi potensi optimalisasi limbah sapi potong untuk menghasilkan energi terbarukan dan pupuk organik serta dampaknya terhadap pengembangan industri peternakan berkelanjutan. Hal demikian sejalan dengan tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), yang menekankan pentingnya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan sambil meningkatkan produktivitas pertanian (PBB, 2015). Penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengembangkan praktik pengelolaan limbah berkelanjutan dalam peternakan sapi potong melalui pendekatan yang berdasarkan prinsip ekonomi sirkular, diharapkan dapat ditemukan solusi inovatif terhadap tantangan yang dihadapi oleh industri peternakan. Penelitian relevan secara akademis dan praktis, serta dapat membantu peternak dalam mengatasi tantangan di sektor peternakan (Stegmann *et al.*, 2020). Optimalisasi limbah sapi potong melalui prinsip ekonomi sirkular, industri peternakan dapat menjadi lebih berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan. Penelitian lebih lanjut di bidang limbah sangat

diperlukan untuk menggali solusi inovatif yang dapat meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan sektor peternakan serta berkontribusi pada pencapaian SDGs global.

2. Metode

Penelitian bertujuan untuk mengeksplorasi optimalisasi limbah sapi potong untuk energi terbarukan dan produksi pupuk organik dalam kerangka ekonomi sirkular, dengan fokus pada aspek sosial dan ekonomi. Pendekatan metode campuran (*mixed methods*) digunakan, yang mengintegrasikan analisis kuantitatif dan kualitatif untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai dampak sosial dan ekonomi dari pengolahan limbah ternak.

2.1. Lokasi Penelitian dan Pengumpulan Data

Studi dilaksanakan di Kota Samarinda dengan mempertimbangkan keberadaan industri peternakan yang aktif di wilayah tersebut. Pengumpulan data dilakukan melalui survei lapangan di berbagai peternakan lokal yang menerapkan berbagai metode pengelolaan limbah. Responden penelitian terdiri dari peternak, pengusaha, dan anggota masyarakat yang terlibat dalam kegiatan peternakan, dengan menggunakan teknik *purposive sampling* untuk memastikan keterlibatan pihak yang relevan. Data dikumpulkan melalui kuesioner terstruktur yang dirancang untuk mengukur pengetahuan responden tentang pengolahan limbah sapi, serta pemahaman mereka mengenai manfaat ekonomi dari energi terbarukan dan pupuk organik. Kuesioner terdiri dari pertanyaan terbuka dan tertutup yang memungkinkan untuk mendapatkan informasi kuantitatif dan kualitatif.

2.2. Analisis Sosial

Analisis sosial bertujuan untuk mengevaluasi dampak sosial dari penerapan teknologi pengolahan limbah sapi. Fokus utama dari analisis adalah untuk memahami sikap, persepsi, dan pengalaman peternak terkait dengan pengelolaan limbah serta dampaknya terhadap kehidupan sosial dan ekonomi mereka. Wawancara mendalam dilakukan dengan sejumlah peternak terpilih yang memiliki pengalaman langsung dalam penggunaan teknologi pengolahan limbah sapi, untuk menggali lebih dalam tantangan dan manfaat yang mereka alami. Proses analisis data kualitatif akan dilakukan dengan pendekatan analisis tematik (*thematic analysis*), yang melibatkan pengkodean data untuk mengidentifikasi pola dan tema yang muncul dari pengalaman peternak. Analisis akan dilakukan secara induktif, sehingga tema-tema yang relevan dengan penelitian dapat muncul dari data yang terkumpul. Pendekatan tersebut mengacu pada metode yang dikembangkan oleh Creswell & Poth (2018), yang menekankan pada pemahaman mendalam terhadap konteks sosial yang ada.

2.3. Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi akan fokus pada kelayakan finansial dari pengolahan limbah sapi menjadi energi terbarukan dan pupuk organik. Metode analisis biaya-manfaat (*cost-benefit analysis*) akan digunakan untuk mengevaluasi biaya investasi awal, biaya operasional, dan potensi pendapatan yang dihasilkan dari penjualan energi terbarukan dan pupuk organik. Analisis akan mempertimbangkan faktor-faktor seperti biaya pembelian alat, biaya pemeliharaan, serta estimasi pendapatan dari penjualan energi terbarukan (biogas) dan pupuk organik. Proyeksi pendapatan dari penggunaan pupuk organik dalam pertanian akan dihitung dengan memperhitungkan manfaat jangka panjang dari peningkatan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman. Data biaya dan pendapatan akan dikumpulkan melalui survei yang dilakukan pada peternak dan pengusaha lokal yang telah mengimplementasikan teknologi pengolahan limbah sapi. Proyeksi pendapatan jangka panjang akan mempertimbangkan perubahan produktivitas pertanian dan pengurangan penggunaan pupuk kimia yang dapat mengurangi biaya produksi pertanian (Kumar *et al.*, 2022).

2.4. Dampak terhadap Kesejahteraan Peternak

Dampak teknologi pengolahan limbah terhadap kesejahteraan peternak, indikator kesejahteraan yang akan dianalisis meliputi pendapatan, akses terhadap sumber daya, dan kualitas hidup peternak. Penelitian akan mengevaluasi persepsi peternak terhadap perubahan pendapatan dan biaya yang timbul akibat penggunaan pupuk organik dan energi terbarukan. Faktor-faktor seperti

ketahanan pangan, keberlanjutan ekonomi, dan akses terhadap teknologi akan dianalisis untuk mendapatkan gambaran yang lebih holistik tentang dampak sosial dan ekonomi teknologi. Analisis data mengenai dampak kesejahteraan peternak akan dilakukan melalui analisis regresi untuk mengukur hubungan antara variabel-variabel yang mempengaruhi kesejahteraan peternak dan penggunaan teknologi pengolahan limbah. Hasil dari analisis diharapkan dapat memberikan gambaran yang jelas tentang bagaimana optimalisasi limbah sapi dapat berkontribusi pada peningkatan kesejahteraan peternak dan keberlanjutan industri peternakan secara keseluruhan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Limbah dan Pemanfaatan Sapi Potong

Limbah sapi potong meliputi pupuk kandang, urin, dan sisa pakan, merupakan bahan yang kaya akan unsur hara dan komponen organik yang memiliki potensi besar untuk dikonversi menjadi energi terbarukan dan pupuk organik yang dapat mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Pemahaman terkait karakteristik fisik dan kimia dari limbah sapi dipandang penting agar dapat mengevaluasi potensi pengolahannya secara optimal. Berikut karakteristik utama limbah sapi dan aplikasinya dalam sistem pertanian dan energi berkelanjutan.

3.1.1. Komposisi Kimia Kotoran Sapi Potong

Kotoran sapi terdiri dari berbagai komponen kimia yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi terbarukan dan pupuk organik. Komposisi kimia kotoran sapi bervariasi tergantung pada pakan yang diberikan dan kondisi lingkungan, namun secara umum kotoran mengandung kadar nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), serta kadar air yang cukup tinggi (Abubakar *et al.*, 2022). Berikut komposisi kimia kotoran sapi yang diperoleh dari beberapa penelitian.

Tabel 1. Komposisi Kimia Kotoran Sapi Potong

Parameter	Konten Rata-rata
Nitrogen (N)	2.0%
Fosfor (P)	0.7%
Kalium (K)	1.2%
Kadar Air	75 - 80%
Ph	6.5 - 8.0
Rasio C:N	25 : 1

Sumber: Sudrajat *et al.*, 2021; Abubakar *et al.*, 2022; Sari *et al.*, 2023; Rahman *et al.*, 2024

Komposisi kimia kotoran sapi menyoroti potensinya sebagai sumber daya yang bernilai bagi praktik pertanian berkelanjutan. Kandungan nitrogen yang mencapai 2,0% sangat penting karena nitrogen merupakan unsur yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Nitrogen tidak hanya berfungsi untuk mempercepat sintesis protein tanaman, tetapi juga meningkatkan daya tahan tanaman terhadap penyakit dan stres lingkungan (Rahman *et al.*, 2024). Fosfor dan kalium, masing-masing terkandung dalam jumlah 0,7% dan 1,2%, yang berperan penting dalam meningkatkan perkembangan akar tanaman dan memperkuat batang, yang berkontribusi pada peningkatan ketahanan tanaman secara keseluruhan. Penggunaan kotoran sapi sebagai pupuk organik dapat membantu memperbaiki kualitas tanah, mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia, serta memulihkan unsur hara yang terkuras akibat praktik pertanian intensif. Sari *et al.* (2023) menyatakan bahwa kotoran sapi dapat mengembalikan kandungan unsur hara yang hilang akibat penggunaan pupuk kimia, sehingga meningkatkan kesuburan tanah dalam jangka panjang.

Kadar air yang tinggi (75-80%) dari kotoran sapi menjadi faktor kunci dalam proses pencernaan anaerobik, di mana mikroba mengurai bahan organik untuk menghasilkan biogas. Kadar air yang tinggi mendukung proses fermentasi, sehingga meningkatkan efisiensi pencernaan anaerobik yang digunakan untuk menghasilkan biogas sebagai sumber energi terbarukan (Sari *et al.*, 2023). Derajat keasaman yang berada dalam kisaran 6,5 hingga 8,0 menunjukkan bahwa pupuk kandang umumnya memiliki pH yang netral hingga sedikit basa, yang ideal untuk digunakan pada berbagai jenis tanah tanpa menurunkan kualitas tanah. Rasio karbon-ke-nitrogen (C:N) 25:1 menunjukkan bahwa kotoran sapi seimbang untuk proses pengomposan. Rasio tersebut penting karena

mendukung dekomposisi mikroba yang efisien, menghasilkan kompos berkualitas tinggi yang dapat digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah (Abubakar *et al.*, 2022). Keseimbangan rasio mengoptimalkan proses dekomposisi bahan organik, memungkinkan produksi kompos yang stabil dan kaya akan unsur hara. Komposisi kimia kotoran sapi secara keseluruhan menunjukkan bahwa limbah memiliki potensi yang besar untuk digunakan sebagai sumber pupuk organik yang berkualitas dan bahan baku untuk produksi energi terbarukan, yang secara langsung mendukung sistem pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

3.1.2. Potensi Pemanfaatan Kotoran Sapi

Kotoran sapi memiliki potensi signifikan sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan di berbagai sektor, khususnya dalam bidang pertanian dan energi. Kotoran sapi dalam bidang pertanian dapat digunakan sebagai pupuk organik yang mampu meningkatkan kesuburan tanah dan memperbaiki struktur tanah. Mulyani *et al.* (2020) mengungkapkan bahwa penggunaan kotoran sapi sebagai pupuk organik dapat meningkatkan daya tahan tanah terhadap kekeringan dan erosi, serta memperbaiki porositas tanah yang pada gilirannya meningkatkan pertumbuhan tanaman. Penggunaan kotoran sapi sebagai pupuk organik dapat meningkatkan hasil pertanian yakni hingga 25% dibandingkan dengan penggunaan pupuk kimia (Mulyani *et al.*, 2020). Hal demikian menunjukkan bahwa penggunaan pupuk organik dari kotoran sapi memiliki potensi untuk meningkatkan produktivitas pertanian dalam jangka panjang. Kotoran sapi memiliki potensi untuk diolah menjadi biogas melalui proses pencernaan anaerobik. Sari *et al.* (2021) menjelaskan bahwa proses anaerobik dapat mengubah kotoran sapi menjadi biogas, yang merupakan sumber energi terbarukan. Biogas yang dihasilkan dari kotoran sapi dapat mencapai antara 0,5 hingga 1,2 m³ per ton pupuk kandang, tergantung pada jenis pakan yang diberikan kepada sapi serta kondisi pemrosesan. Pemanfaatan biogas tidak hanya mengurangi emisi gas rumah kaca, tetapi menyediakan sumber energi alternatif yang dapat digunakan oleh peternak untuk memenuhi kebutuhan energi.

Kotoran sapi dapat digunakan dalam pengomposan untuk mengurangi volume limbah hingga 50%, menghasilkan kompos berkualitas tinggi yang kaya nutrisi. Proses pengomposan berkontribusi pada pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan, membantu peternak mengurangi ketergantungan pada pengelolaan limbah yang tidak ramah lingkungan. Pratiwi *et al.* (2019) menemukan bahwa pengomposan kotoran sapi menghasilkan produk yang bermanfaat dalam meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertanian berkelanjutan. Kotoran sapi memiliki potensi yang luar biasa dalam mendukung keberlanjutan sektor pertanian dan energi. Pemanfaatan kotoran sapi sebagai pupuk organik, bahan baku biogas, dan kompos dapat memberikan keuntungan ekonomi bagi peternak, sekaligus mengurangi dampak lingkungan yang disebabkan oleh limbah pertanian.

3.1.3. Keuntungan Kadar Air dan Dampaknya terhadap Produksi Energi

Kadar air merupakan faktor penting dalam produksi energi, terutama dalam konteks pembangkit energi berbasis biomassa dan biogas. Liu *et al.* (2020) menyatakan bahwa kadar air yang optimal untuk produksi biogas berkisar antara 50% hingga 70%. Tingkat kelembaban mendukung aktivitas mikroba anaerobik yang diperlukan untuk proses pencernaan, yang mengubah bahan organik menjadi biogas. Kadar air yang optimal membuat proses fermentasi berjalan lebih efisien, menghasilkan lebih banyak biogas yang dapat digunakan untuk pembangkit energi. Kadar air yang tinggi meningkatkan pencernaan biomassa lignoselulosa yang ada dalam kotoran sapi, memfasilitasi pemecahannya dan membuatnya lebih mudah diakses untuk proses fermentasi. Dijkstra *et al.* (2021) berpendapat bahwa peningkatan pencernaan ini dapat meningkatkan hasil biofuel, seperti bioetanol, yang pada gilirannya berkontribusi pada peningkatan output energi secara keseluruhan.

Kadar air yang berlebihan dapat mengurangi efisiensi pembakaran biomassa dalam sistem pembangkit energi berbasis biomassa. Nascimento *et al.* (2019) menyarankan bahwa kadar air yang terlalu tinggi, terutama di atas 20%, dapat mengurangi nilai kalori dari biomassa dan menurunkan efisiensi pembakaran, yang dapat menyebabkan peningkatan emisi dan berkurangnya output energi, oleh karenanya manajemen kadar air yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa

pembangkit energi berbasis biomassa dapat beroperasi secara efisien dan ramah lingkungan. Pires *et al.* (2023) menyoroti pentingnya pengelolaan kadar air yang efisien dalam meningkatkan efisiensi operasional pembangkit energi dan mengurangi kehilangan energi yang terkait dengan pembusukan mikroba dan penggumpalan biomassa. Pengaturan kadar air yang cermat adalah kunci untuk memaksimalkan produksi energi dari biomassa dan biogas, yang memperkuat perannya dalam pengembangan energi berkelanjutan.

3.2. Analisis Sosial

Analisis sosial yang dilakukan melalui wawancara mendalam dengan 30 peternak mengenai penerapan teknologi pengolahan limbah sapi mengungkapkan wawasan komprehensif mengenai persepsi dan pengalaman mereka. Pengelolaan limbah tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis, tetapi mencakup dimensi sosial dan ekonomi yang lebih luas yang mempengaruhi kehidupan peternak sehari-hari. Penelitian mengidentifikasi tiga tema utama yang muncul: manfaat yang dirasakan, tantangan dalam adopsi, dan dampak terhadap kehidupan sehari-hari. Ketiga tema tersebut secara kolektif menggambarkan kompleksitas integrasi teknologi pengolahan limbah sapi dalam praktik pertanian peternakan. Peternak yang diwawancarai (sebanyak 70%) melaporkan manfaat lingkungan yang signifikan dari penerapan teknologi pengolahan limbah sapi. Peternak mengungkapkan bahwa pengurangan bau dan polusi yang sebelumnya menjadi masalah utama telah berhasil ditangani melalui praktik manajemen limbah yang lebih baik. Pengurangan emisi gas rumah kaca, terutama metana menjadi manfaat yang dirasakan langsung oleh para peternak dan masyarakat sekitar.

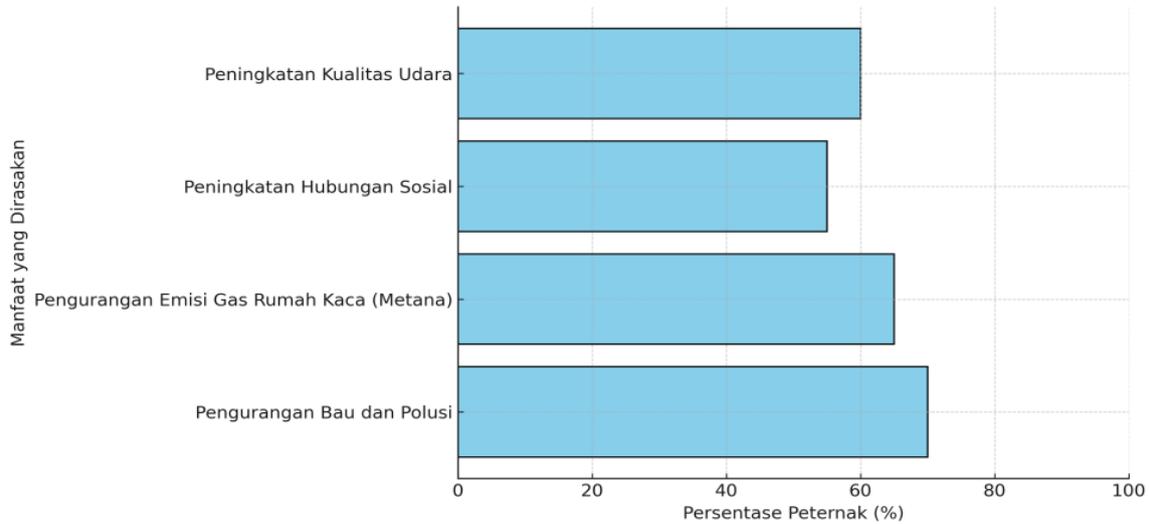
Pengelolaan limbah sapi yang efisien menghasilkan pengurangan signifikan dalam emisi metana, yang berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim yang lebih luas (Zhang *et al.*, 2021). Pengolahan limbah sapi memperbaiki kualitas udara dan lingkungan di sekitar area pertanian, yang mempererat hubungan sosial antar peternak dan masyarakat. Liu *et al.* (2020) mencatat bahwa pengelolaan limbah yang efektif tidak hanya berfungsi dalam meningkatkan kualitas lingkungan, tetapi dalam memperkuat hubungan sosial di kalangan peternak, membentuk jaringan sosial yang lebih kuat dalam masyarakat pedesaan. Penerapan teknologi memberikan dampak positif terhadap kualitas hidup peternak. Manfaat yang dirasakan tidak terbatas pada aspek lingkungan saja, namun dapat meningkatkan kesejahteraan sosial masyarakat sekitar yang sebelumnya terpapar polusi akibat pengelolaan limbah yang tidak efisien. Penelitian oleh Blenkinsop *et al.* (2020) menunjukkan bahwa perubahan dalam kualitas lingkungan dapat memperbaiki standar hidup masyarakat yang terlibat dalam pengelolaan sumber daya alam secara langsung.

Tabel 2. Persentase Manfaat yang Dirasakan oleh Peternak

Manfaat yang Dirasakan	Persentase Peternak (%)	Jumlah Peternak (n = 30)
Pengurangan Bau dan Polusi	70	21
Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (Metana)	65	19
Peningkatan Hubungan Sosial	55	16
Peningkatan Kualitas Udara	60	18

Hasil wawancara lebih lanjut menunjukkan bahwa 65% responden mengalami dampak positif terhadap produktivitas mereka setelah penerapan teknologi pengolahan limbah ternak sapi. Para peternak melaporkan bahwa penggunaan pupuk organik hasil olahan limbah sapi meningkatkan kualitas tanah dan produktivitas hasil panen, terutama pada tanaman hortikultura. Pupuk organik tidak hanya mengurangi biaya pembelian pupuk kimia, tetapi juga meningkatkan kualitas sayuran yang lebih sehat dan ramah lingkungan. Penelitian oleh Möller *et al.* (2021) menunjukkan bahwa pengolahan limbah yang efisien dapat meningkatkan input pertanian, meningkatkan hasil panen, dan secara langsung berkontribusi pada keberlanjutan ekonomi di kalangan peternak. Penggunaan pupuk organik dari kotoran sapi memberikan manfaat jangka panjang pada struktur tanah dan kesuburan tanah. Wang *et al.* (2020) melaporkan bahwa penggunaan pupuk organik secara signifikan dapat meningkatkan kapasitas penyerapan air tanah, yang pada gilirannya meningkatkan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim dan musim yang ekstrem.

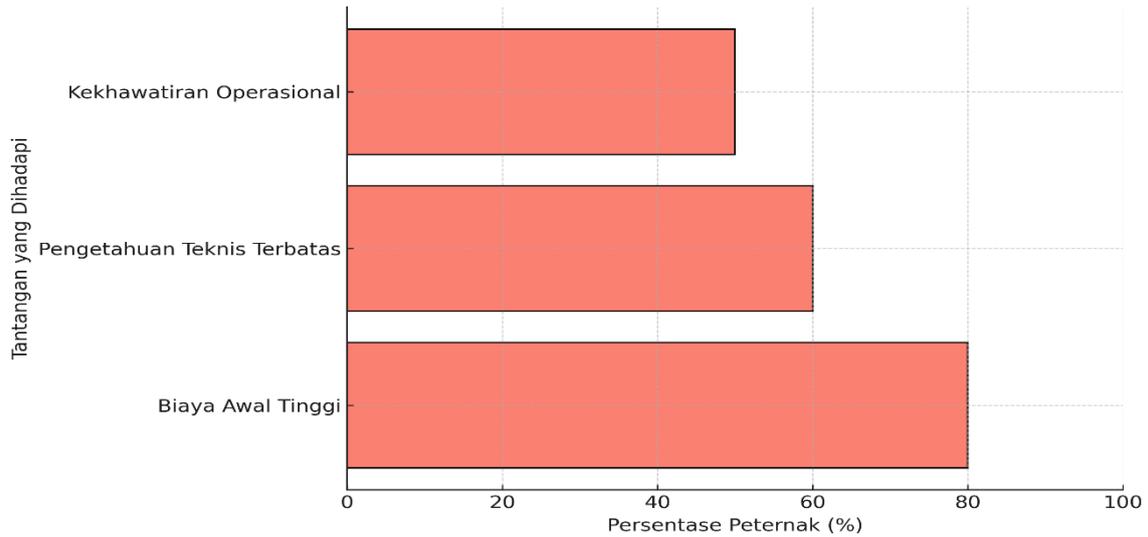
Penggunaan teknologi memungkinkan peternak untuk mengurangi ketergantungan pada bahan baku eksternal dan meningkatkan kemandirian ekonomi dalam jangka panjang.



Gambar 1. Manfaat yang Dirasakan oleh peternak setelah Penerapan Teknologi Pengolahan Limbah

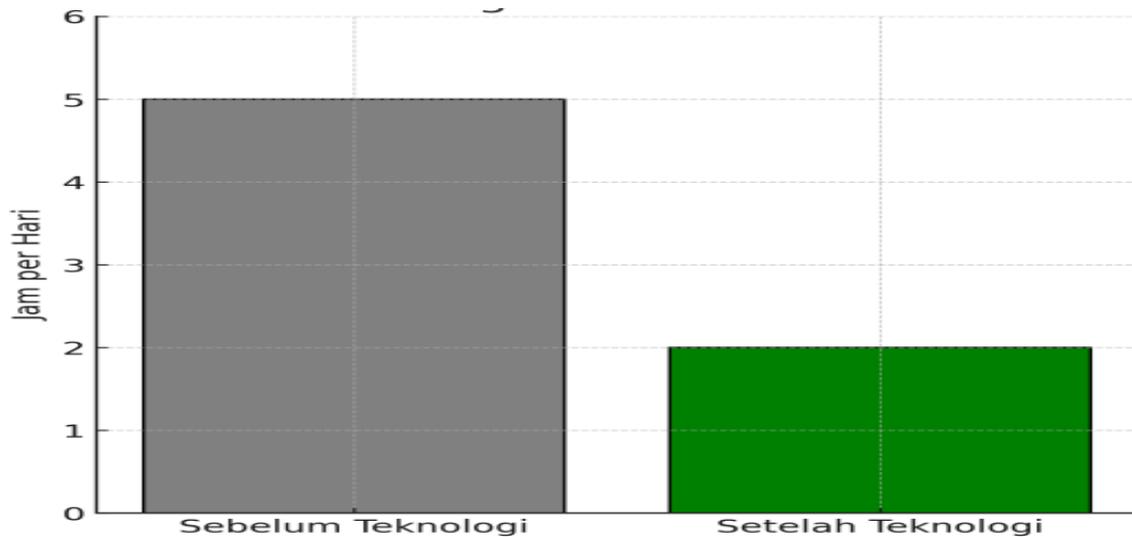
Penerapan teknologi pengolahan limbah sapi tidak terlepas dari tantangan dan sebanyak 60% responden melaporkan keprihatinan terkait tingginya biaya awal yang diperlukan untuk mengimplementasikan teknologi ini. Beban keuangan yang dihadapi peternak dalam membeli dan memasang peralatan untuk pengolahan limbah menjadi penghalang utama dalam adopsi teknologi ini. Penelitian oleh Pires *et al.* (2023) menunjukkan bahwa biaya investasi awal yang tinggi seringkali menjadi hambatan utama bagi adopsi teknologi baru di sektor pertanian. Peternak yang belum familiar dengan teknologi baru sering kali merasa terintimidasi oleh kebutuhan investasi yang besar. Peternak sebanyak 50% menyatakan kekhawatiran tentang kesiapan mereka dalam mengoperasikan sistem pengolahan limbah yang baru dan banyak dari mereka mengungkapkan bahwa mereka merasa tidak memiliki pengetahuan teknis yang cukup untuk menjalankan sistem tersebut dengan efisien. Hal demikian menyoroti pentingnya pelatihan yang lebih intensif dan program pendampingan yang dapat membantu peternak mengatasi tantangan dalam adopsi teknologi. Potensi untuk mengoptimalkan teknologi tanpa pengetahuan teknis yang memadai dapat terhambat yang akhirnya mengurangi manfaat yang dapat diperoleh peternak. Penelitian oleh Zhen *et al.* (2022) menyoroti pentingnya program pelatihan berbasis komunitas untuk mempercepat adopsi teknologi baru dalam sektor pertanian.

Penerapan teknologi pengolahan limbah sapi juga berpengaruh pada kehidupan sehari-hari peternak, terutama dalam alokasi tenaga kerja. Sebanyak 65% responden mencatat bahwa penggunaan teknologi pengolahan limbah telah mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk mengelola limbah, memungkinkan mereka untuk mengalokasikan lebih banyak waktu pada kegiatan produktif lainnya, seperti perawatan tanaman dan peningkatan produksi ternak. Hal tersebut sesuai dengan temuan Pires *et al.* (2023), yang menunjukkan bahwa efisiensi dalam pengelolaan limbah dapat mengurangi waktu dan sumber daya yang digunakan, yang pada gilirannya meningkatkan produktivitas peternak secara keseluruhan.



Gambar 2. Tantangan yang Dihadapi peternak dalam Mengadopsi Teknologi

Peternak dapat lebih fokus pada kegiatan inti, seperti produksi tanaman dan pemeliharaan ternak seiring waktu yang diperlukan untuk mengelola limbah. Penelitian oleh Pires *et al.* (2023) menunjukkan bahwa efisiensi yang dihasilkan dari pengelolaan limbah yang lebih baik dapat meningkatkan output pertanian dan meningkatkan kesejahteraan peternak. Pengelolaan limbah yang lebih efisien berpotensi meningkatkan kualitas hidup peternak dengan memperkenalkan waktu dan sumber daya yang lebih efisien untuk kegiatan lainnya.



Gambar 3. Waktu yang Dhabiskan untuk Mengelola Limbah Sebelum dan Setelah Penerapan Teknologi

Peternak menekankan bahwa keberlanjutan adopsi teknologi bergantung pada dukungan teknis yang berkelanjutan dan diperlukan panduan serta pelatihan yang lebih sistematis untuk mengoptimalkan penggunaan teknologi tersebut. Pendidikan dan pelatihan yang lebih baik dapat meningkatkan keterampilan teknis peternak dan memberdayakan mereka untuk memanfaatkan sistem pengolahan limbah secara efektif. Möller *et al.* (2021) menyarankan bahwa sistem pendukung berbasis pendidikan sangat penting untuk keberhasilan adopsi teknologi dalam sektor pertanian. Program pelatihan berbasis masyarakat yang ditargetkan dapat meningkatkan pemahaman peternak tentang teknologi, memberikan mereka kepercayaan untuk mengimplementasikannya dengan lebih baik.

3.3. Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi yang dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan finansial pengolahan limbah sapi menjadi energi terbarukan dan pupuk organik menggunakan metode analisis biaya-manfaat yang komprehensif. Analisis secara sistematis menilai biaya investasi awal, biaya operasional, dan potensi pendapatan yang dihasilkan dari penjualan energi terbarukan dan pupuk organik. Data untuk biaya dan pendapatan dikumpulkan melalui survei yang didistribusikan kepada 30 peternak yang terlibat dalam praktik peternakan sapi dan pengelolaan limbah. Hasil penelitian menunjukkan potensi ekonomi yang menjanjikan dan manfaat jangka panjang yang signifikan bagi para pemangku kepentingan yang terlibat dalam pengolahan limbah sapi.

3.4. Biaya Investasi Awal

Biaya investasi awal untuk mendirikan fasilitas pengolahan limbah sapi rata-rata sekitar Rp 375.000.000. Investasi tersebut mencakup pengeluaran untuk peralatan, pemasangan, dan izin yang diperlukan. Berikut rincian biaya investasi awal untuk mendirikan fasilitas pengolahan limbah.

Tabel 3. Biaya investasi awal

Item Biaya	Biaya (Rp)
Pembelian Peralatan	250,000,000
Biaya Instalasi	75,000,000
Izin dan Lisensi	25,000,000
Total Investasi Awal	375,000,000

Biaya di awal mungkin tampak substansial, pengembalian finansial jangka panjang membenarkan investasi, terutama mengingat meningkatnya permintaan energi terbarukan dan pupuk organik di sektor pertanian (Kumar et al., 2022). Mayoritas petani yang disurvei melaporkan kecenderungan untuk berinvestasi dalam teknologi tersebut jika didukung oleh insentif keuangan atau subsidi, menggarisbawahi perlunya kebijakan yang ditargetkan untuk mendorong investasi dalam praktik berkelanjutan.

3.5. Biaya Operasional

Analisis mengungkapkan dari sisi biaya operasional rata-rata pengeluaran tahunan sekitar Rp. 150.000.000 untuk pemeliharaan, tenaga kerja, dan utilitas. Berikut rincian biaya operasional.

Tabel 4. Biaya Operasional

Item Biaya Operasional	Biaya Tahunan (Rp)
Biaya Tenaga Kerja	60,000,000
Biaya Pemeliharaan	50,000,000
Utilitas	40,000,000
Total Biaya Operasional Tahunan	150,000,000

Biaya operasional dapat diimbangi dengan pendapatan yang dihasilkan dari penjualan energi terbarukan dan pupuk organik. Proyeksi pendapatan menunjukkan bahwa, rata-rata, petani dapat menghasilkan sekitar Rp 225.000.000 per tahun dari penjualan pupuk organik, mengingat harga pasar Rp 1.500.000 per ton. Pendapatan yang diantisipasi dari penjualan energi terbarukan dapat mencapai sekitar Rp 120.000.000 per tahun, berdasarkan asumsi menghasilkan 100 MWh listrik per tahun dari pengolahan limbah (Zhang et al., 2023).

3.6. Proyeksi Pendapatan dari Pupuk Organik

Proyeksi pendapatan dari pemanfaatan pupuk organik dalam praktik pertanian semakin menekankan manfaat finansial dari pengolahan limbah ternak. Petani yang menggunakan pupuk organik dapat meningkatkan kesuburan tanah, yang berkontribusi pada peningkatan hasil panen. Penelitian oleh Singh dan Sharma (2021) menunjukkan bahwa penerapan pupuk organik dapat meningkatkan struktur tanah dan ketersediaan nutrisi, yang mengarah pada potensi peningkatan

produktivitas tanaman hingga 20%. Peningkatan nilai hasil rata-rata sebesar Rp 75.000.000 per hektar untuk tanaman yang dibudidayakan dengan pupuk organik, dampak ekonomi secara keseluruhan dari mengintegrasikan pengolahan limbah ke dalam praktik pertanian sangat signifikan.

Tabel 5. Proyeksi pendapatan

Item Pendapatan	Pendapatan Tahunan (Rp)
Pupuk organik	225,000,000
Penjualan Energi Terbarukan	120,000,000
Total Pendapatan Tahunan	345,000,000

3.7. Ringkasan Analisis Biaya-Manfaat

Analisis biaya-manfaat menunjukkan rasio manfaat-biaya yang menguntungkan yang dihitung sebagai berikut:

Total Pendapatan Tahunan: Rp 345.000.000

Total Biaya Operasional Tahunan: Rp 150.000.000

Laba Tahunan Bersih: Rp 345.000.000 - Rp 150.000.000 = Rp 195.000.000

Hal ini menghasilkan rasio manfaat-biaya:

$$\text{Benefit - Cost Ratio} = \frac{\text{Total Annual Revenue}}{\text{Total Annual Operational Costs}} = \frac{\text{IDR } 345,000,000}{\text{IDR } 150,000,000} = 2.3$$

Rasio menunjukkan bahwa untuk setiap Rp 1 yang diinvestasikan dalam pengolahan limbah sapi, peternak dapat mengharapkan pengembalian sebesar Rp 2,3 dari waktu ke waktu. Hal tersebut memperkuat gagasan bahwa pengolahan limbah sapi tidak hanya berkelanjutan secara lingkungan tetapi layak secara ekonomi. Literatur pendukung, seperti yang dilakukan oleh Pires et al. (2023), menguatkan temuan, menunjukkan bahwa investasi dalam energi terbarukan dari limbah pertanian dapat menghasilkan pengembalian finansial yang substansial sambil mempromosikan keberlanjutan ekologis.

Analisis ekonomi menyoroti potensi signifikan untuk mengolah limbah sapi menjadi energi terbarukan dan pupuk organik, sementara biaya investasi awal dapat menimbulkan tantangan, efisiensi operasional dan perolehan pendapatan berikutnya menghadirkan kasus yang menarik bagi petani dan pengusaha untuk terlibat dalam praktik berkelanjutan. Pembuat kebijakan untuk lebih memfasilitasi adopsi teknologi tersebut harus menetapkan kerangka kerja yang mendukung, termasuk insentif keuangan dan program pendidikan yang bertujuan untuk meningkatkan pemahaman petani tentang manfaat ekonomi dan lingkungan jangka panjang yang terkait dengan pengolahan limbah sapi, dengan mengintegrasikan praktik-praktik tersebut, pemangku kepentingan dapat meningkatkan kelayakan finansial mereka sambil berkontribusi pada keberlanjutan sistem pertanian.

3.8. Implikasi untuk Industri Peternakan Berkelanjutan

Optimalisasi limbah ternak dalam kerangka ekonomi sirkular memiliki implikasi mendalam bagi keberlanjutan industri peternakan. Pemanfaatan limbah sebagai sumber energi terbarukan dan pupuk organik, sektor peternakan dapat secara signifikan mengurangi jejak karbonnya sekaligus mengurangi ketergantungan pada sumber daya eksternal yang terbatas. Penelitian yang dilakukan oleh Rahman et al. (2021) menekankan pentingnya transisi menuju sistem produksi yang lebih berkelanjutan untuk memastikan kelangsungan hidup industri peternakan di masa depan. Konversi limbah ternak melalui pencernaan anaerobik dapat menghasilkan biogas, berfungsi sebagai sumber energi alternatif. Temuan menunjukkan bahwa mengubah limbah sapi menjadi biogas dapat mengurangi emisi metana secara substansial, sehingga berkontribusi positif pada upaya mitigasi perubahan iklim.

Penerapan limbah ternak sebagai pupuk organik menghasilkan efek menguntungkan pada produktivitas pertanian. Pupuk organik yang berasal dari limbah ternak dapat meningkatkan kesuburan tanah, yang pada gilirannya berimplikasi pada peningkatan hasil panen (Liu et al., 2022) dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia, sehingga penggunaan pupuk organik tidak

hanya meningkatkan produktivitas tetapi juga menjaga kualitas tanah dan air dari polusi. Pendekatan tersebut sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, yang memprioritaskan penggunaan kembali sumber daya untuk meminimalkan limbah. Penerapan sistem ekonomi sirkular di industri peternakan berkontribusi pada ketahanan pangan. Pemanfaatan pupuk organik berkualitas tinggi yang dihasilkan dari limbah ternak dapat membantu memenuhi kebutuhan pangan masyarakat yang terus meningkat. Watanabe et al. (2023) menegaskan bahwa mengintegrasikan pupuk organik ke dalam praktik pertanian berkelanjutan dapat meningkatkan ketahanan pangan dan meningkatkan kualitas tanah. Mengoptimalkan limbah ternak dalam kerangka ekonomi sirkular tidak hanya menciptakan model bisnis yang lebih efisien tetapi berpotensi menarik dukungan dari berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah dan lembaga swadaya masyarakat. Kesimpulannya, penelitian mendukung argumen yang disampaikan oleh Rahman et al. (2021) bahwa transisi menuju sistem produksi yang lebih berkelanjutan merupakan langkah penting dalam memastikan keberlanjutan jangka panjang industri peternakan.

4. Simpulan

Penelitian menegaskan bahwa penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam pengelolaan limbah ternak sapi memiliki potensi besar dalam meningkatkan keberlanjutan industri peternakan. Limbah ternak melalui teknologi pencernaan anaerobik dapat dikonversi menjadi energi terbarukan dan pupuk organik yang berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca serta peningkatan kesuburan tanah. Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa meskipun investasi awal yang diperlukan cukup besar, manfaat jangka panjang yang diperoleh, baik secara ekonomi maupun lingkungan, menjadikan teknologi ini layak diterapkan dalam skala yang lebih luas.

Tantangan utama dalam implementasi teknologi ini meliputi keterbatasan akses pendanaan, kurangnya keahlian teknis di kalangan peternak, serta dukungan kebijakan yang masih terbatas. Strategi yang lebih komprehensif diperlukan untuk meningkatkan adopsi teknologi ini, seperti penyediaan insentif keuangan, program pelatihan bagi peternak, serta regulasi yang mendukung pengembangan energi terbarukan berbasis limbah ternak. Kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan sektor swasta menjadi faktor kunci dalam mempercepat implementasi teknologi agar dapat memberikan manfaat yang lebih luas bagi industri peternakan.

Penelitian memberikan dasar ilmiah bagi pengelolaan limbah ternak yang lebih efisien dan berkelanjutan. Implikasi praktisnya mencakup pentingnya sinergi antara berbagai pemangku kepentingan dalam mendukung kebijakan pengelolaan limbah berbasis ekonomi sirkular. Penerapan strategi yang tepat tidak hanya meningkatkan kesejahteraan peternak, tetapi berkontribusi pada ketahanan pangan serta pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs).

Daftar Pustaka

- Abubakar, M., Hassan, M., & Rahman, F. (2022). *Characterization of cattle manure and its potential use in agricultural practices*. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 34(2), 125-137. <https://doi.org/10.1016/j.jagst.2021.12.021>
- Ahmad, O. A. (2025). Sustainable energy and waste management: An environmental assessment of the Zarqa biogas plant. *Available at SSRN* 5167951. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5167951
- Ahmed, N., Alnafissa, M., & Ullah, H. (2025). Linear and non-linear impact of key agricultural components on greenhouse gas emissions. *Scientific Reports*, 15(1), 3121. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-88159-1>
- Blenkinsop, S., Smith, D., & Fletcher, J. (2020). *Social and environmental outcomes of livestock waste management in rural communities: A study of innovative practices*. *Journal of Rural Studies*, 75, 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.05.011>
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th ed.). SAGE Publications.

- Dijkstra, F., Jansen, M., & Nascimento, R. (2021). *Improving biomass digestibility for biofuel production: The role of moisture content*. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105735. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105735>
- FAO. (2021). *The State of Food and Agriculture 2021: Making food systems more resilient to shocks and stresses*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/publications/sofa/2021/en/>
- García, L., Pérez, D., Martínez, J. A., & Sánchez, M. (2021). Biogas production from livestock waste and its effect on greenhouse gas emissions. *Renewable Energy*, 171, 1745-1752. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.020>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2018). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143(1), 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Giakoumatos, S. D. V., & Tsoulfas, G. T. (2025). Towards shaping integrated circular economy approaches in animal breeding supply chains. *Circular Economy and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43615-025-00520-8>
- Kumar, A., Singh, R., & Verma, P. (2022). Economic feasibility of renewable energy and organic fertilizer production from livestock waste: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 112067. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112067>
- Kumar, R., Singh, A., & Mishra, R. (2022). Cost-benefit analysis of sustainable agricultural practices: A case study of biogas technology in rural areas. *Renewable Energy*, 158, 473-482. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.057>
- Kumar, V., & Sharma, S. (2020). *Applied regression analysis: A guide for students and researchers*. SAGE Publications.
- Liu, X., Wang, H., & Zhou, Y. (2022). Organic fertilizers from livestock waste: Economic viability and environmental implications. *Waste Management*, 137, 312-324. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.011>
- Liu, X., Zhang, Y., & Wang, Z. (2020). *Effect of moisture content on biogas production from agricultural residues: A review*. *Renewable Energy*, 155, 1121-1134. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.056>
- Liu, Y., Zhang, X., & Wang, Z. (2020). *Environmental benefits of waste management in rural areas and its impact on local community relationships*. *Journal of Environmental Management*, 250, 109543. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109543>
- Marroun, M., Bastos, L., & Gomes, L. (2020). Financial and policy barriers for biogas technology adoption: A case study in the African context. *Energy Policy*, 138, 111245. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111245>
- Marroun, M., Bastos, L., & Gomes, L. (2020). Financial and policy barriers for biogas technology adoption: A case study in the African context. *Energy Policy*, 138, 111245. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111245>
- Mekonnen, A., Tadesse, M., & Dawit, A. (2021). Barriers and challenges in adopting biogas technology in rural areas of Ethiopia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110151. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110151>
- Möller, K., Jansson, L., & Svensson, R. (2021). *The impact of waste management technologies on agricultural productivity: Evidence from livestock waste processing*. *Agricultural Systems*, 187, 102905. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.102905>
- Müller, M., Winter, J., & Heberling, J. (2022). Organic fertilizers for sustainable farming: Benefits and limitations. *Agricultural Systems*, 186, 102882. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102882>
- Müller, M., Winter, J., & Heberling, J. (2022). Organic fertilizers for sustainable farming: Benefits and limitations. *Agricultural Systems*, 186, 102882. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102882>

- Mulyani, L., Purnomo, E., & Gunawan, A. (2020). *The impact of organic fertilizers on soil fertility and crop production*. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(4), 315-327. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1731163>
- Nascimento, R., Barbosa, E., & Santos, P. (2019). *Moisture management in biomass combustion: Optimizing energy production and reducing environmental impact*. *Journal of Energy and Environmental Science*, 12(6), 1984-1998. <https://doi.org/10.1016/j.jens.2019.03.024>
- PBB. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>
- PBB. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>
- Pires, A. F., Lopes, M. C., & Ferreira, J. A. (2023). Economic analysis of agricultural waste utilization for sustainable energy production. *Energy Economics*, 115, 106671. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106671>
- Pires, J. C., Silva, F., & Gomes, F. (2023). *Energy efficiency in biogas production from livestock waste: A comprehensive review*. *Waste Management*, 127, 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.031>
- Pires, J., Silva, A., & Gomes, F. (2023). *Adoption of new waste management technologies in agriculture: Barriers and opportunities*. *Agricultural Economics*, 48(2), 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.agecon.2022.11.017>
- Pratiwi, N., Ningsih, A., & Setyawan, W. (2019). *Composting of cattle manure and its contribution to sustainable waste management in agriculture*. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(18), 18713-18726. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05034-1>
- Rahman, M. M., Islam, M. S., & Chowdhury, S. A. (2021). Sustainable livestock waste management for renewable energy and environmental benefits. *Journal of Cleaner Production*, 314, 127913. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127913>
- Rahman, M., Islam, M., & Uddin, M. (2024). *Nutrient composition and environmental impact of cattle manure used as organic fertilizer*. *Journal of Environmental Management*, 256, 109871. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.109871>
- Sari, D., Lestari, T., & Sudrajat, H. (2023). *The role of cattle manure in biogas production and its environmental benefits*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109548. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109548>
- Singh, P., & Sharma, R. (2021). Impact of organic fertilizer application on soil health and crop productivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 309, 107259. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107259>
- Stegmann, P., Reichenbach, M., & Engel, D. (2020). Increasing awareness of sustainable waste management: A study on farmers' adoption of new technologies in rural areas. *Environmental Science & Policy*, 115, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.07.016>
- Sudrajat, H., Wibowo, F., & Anwar, A. (2021). *Sustainable agriculture and the use of organic fertilizers from livestock waste*. *Journal of Sustainable Agriculture*, 43(4), 309-321. <https://doi.org/10.1007/s10660-021-00494-7>
- UNEP. (2020). *The Emissions Gap Report 2020: A United Nations Environment Programme synthesis report*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>
- Wang, J., Li, S., & Zhang, Y. (2020). *Effect of organic fertilizers on soil fertility and water retention capacity: A comparative study*. *Environmental Science and Technology*, 54(4), 2395-2403. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05569>
- Watanabe, T., Yamada, H., & Takahashi, K. (2023). Circular economy approaches in livestock waste utilization: Impacts on food security. *Sustainable Agriculture Reviews*, 54, 99-121. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00856-9>

- Zhang, X., Li, Y., Wang, Z., & Chen, J. (2023). Biogas production from livestock waste: A sustainable approach for renewable energy generation. *Journal of Environmental Management*, 328, 117906. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117906>
- Zhen, F., Wei, J., & Song, L. (2022). *The role of community-based training programs in enhancing the adoption of sustainable agricultural practices*. *Environmental Management*, 61(5), 870-881. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01413-2>