

Analisis Siklus Nutrien dan Produktivitas Primer pada Sistem Integrasi Tanaman-Ternak untuk Pengembangan Kawasan Edukasi Sains di Kabupaten Konawe Utara

*** Muhamad Idham Handa**

¹ Universitas Lakidende Unaaha, Konawe, Indonesia

muhamadidham1984@gmail.com¹

Abstract

Integrated crop-livestock systems offer significant ecological potential beyond their economic benefits, particularly in nutrient cycling and primary productivity. This study aims to analyze the nutrient cycle and estimate the primary productivity of integrated crop-livestock systems across four agro-tourism typologies in North Konawe Regency, and to assess their potential as science education areas. The research employed a mixed-method approach combining spatial analysis using Geographic Information Systems (GIS) for typology mapping, field observations, and literature review to analyze potential nutrient flows (carbon, nitrogen, phosphorus, potassium). The results identified four distinct ecological typologies: (I) Coastal Alluvial Areas, (II) Lowland Plantations, (III) Agroforestry Zones, and (IV) Highland Plantations. The analysis revealed a closed-loop nutrient cycle within the integrated system, where agricultural waste (rice straw, cocoa husks) is converted into animal feed, and livestock manure is processed into organic fertilizer, effectively returning essential nutrients to the soil. This cycle enhances ecological efficiency and is estimated to increase primary productivity compared to monoculture systems. Each typology presents unique characteristics suitable for outdoor science laboratories, enabling the study of biogeochemical cycles, ecology, and sustainable agriculture. It is concluded that the integrated crop-livestock system in North Konawe establishes an ecologically efficient nutrient cycle, positioning the region as a high-potential area for developing science education zones based on local ecological wisdom.

Keywords: biogeochemical cycle; crop-livestock integration; ecological efficiency; outdoor science laboratory; primary productivity.

Informasi Artikel:

Received 25/10/2025

Revised 10/11/2025

Accepted 17/11/2025

Published 30/11/2025

Abstrak

Sistem integrasi tanaman-ternak menawarkan potensi ekologis yang signifikan di luar manfaat ekonominya, khususnya dalam siklus nutrien dan produktivitas primer. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis siklus nutrien dan memperkirakan produktivitas primer pada sistem integrasi tanaman-ternak di empat tipologi agrowisata Kabupaten Konawe Utara, serta menilai potensinya sebagai kawasan edukasi sains. Penelitian menggunakan pendekatan mixed-method yang menggabungkan analisis spasial dengan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk pemetaan tipologi, observasi lapangan, dan studi literatur untuk menganalisis potensi aliran nutrien (karbon, nitrogen, fosfor, kalium). Hasil penelitian mengidentifikasi empat tipologi ekologis yang berbeda: (I) Kawasan Pesisir Aluvial, (II) Perkebunan Dataran Rendah, (III) Zona Agroforestri, dan (IV) Perkebunan Dataran Tinggi. Analisis menunjukkan adanya siklus nutrien tertutup dalam sistem integrasi, di mana limbah pertanian (jerami padi, kulit kakao) dikonversi menjadi pakan ternak, dan kotoran ternak diolah menjadi pupuk organik, secara efektif mengembalikan unsur hara esensial ke tanah. Siklus ini meningkatkan efisiensi ekologis dan diperkirakan meningkatkan produktivitas primer dibandingkan sistem monokultur. Setiap tipologi memiliki karakteristik unik yang cocok sebagai laboratorium alam, memungkinkan pembelajaran tentang siklus biogeokimia, ekologi, dan pertanian berkelanjutan. Disimpulkan bahwa sistem integrasi tanaman-ternak di Konawe Utara membangun siklus nutrien yang

efisien secara ekologis, sehingga menempatkan wilayah ini sebagai area potensial tinggi untuk pengembangan zona edukasi sains berbasis kearifan ekologis lokal.

Kata kunci: efisiensi ekologis; integrasi tanaman-ternak; laboratorium alam; produktivitas primer; siklus biogeokimia.

Corresponding Author: muhamadidham1984@gmail.com ^{1}

Pendahuluan

Sistem integrasi tanaman-ternak (crop-livestock integration) merupakan pendekatan pertanian yang mereplikasi prinsip ekologi alami, di mana terjadi interaksi saling menguntungkan antara subsistem tanaman dan hewan. Dalam perspektif sains, sistem ini menawarkan peluang untuk mempelajari siklus biogeokimia secara terapan, terutama aliran karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) yang berlangsung dalam suatu ekosistem buatan (Mistriani dkk., 2024; Setyowati dkk., 2024). Limbah pertanian yang kaya akan bahan organik dapat dikonversi menjadi pakan ternak, sementara kotoran ternak yang mengandung unsur hara esensial dapat difermentasi menjadi pupuk organik yang menyuburkan lahan pertanian. Proses ini menciptakan siklus nutrisi tertutup (closed-loop nutrient cycle) yang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada input eksternal seperti pupuk kimia, tetapi juga meningkatkan efisiensi ekologis dan produktivitas primer suatu kawasan (Han dkk., 2020; Wang dkk., 2023). Produktivitas primer, yang mengacu pada laju akumulasi biomassa oleh tanaman melalui fotosintesis, menjadi indikator kunci kesehatan ekosistem dan potensi daya dukung lingkungan (Ammirato dkk., 2020). Dalam konteks pendidikan sains, sistem terintegrasi semacam ini dapat berfungsi sebagai laboratorium alam (outdoor science laboratory) yang memungkinkan peserta didik mengamati secara langsung konsep-konsep abstrak seperti dekomposisi, mineralisasi, rantai makanan, dan aliran energi dalam ekosistem (Jumiyati & Frimawaty, 2023; Djuwendah dkk., 2023).

Kabupaten Konawe Utara (Konut) di Sulawesi Tenggara memiliki lanskap yang didominasi oleh dataran rendah hingga perbukitan dengan potensi pertanian subur dan peternakan yang umumnya masih dijalankan secara parsial dan tradisional. Berdasarkan data PDRB tahun 2022, sektor pertanian memberikan kontribusi terbesar dalam struktur ekonomi daerah, mencapai 39,23 persen, dengan komoditas unggulan meliputi kakao, kelapa, cengkih, padi, jagung, serta ternak sapi dan kambing (BPS Konawe Utara, 2023). Namun, praktik pertanian yang ada cenderung bersifat monokultur dan belum mengintegrasikan subsistem tanaman dan ternak secara optimal. Limbah pertanian seperti jerami padi, kulit kakao, dan daun singkong sering kali hanya dibakar atau dibiarkan membusuk, berpotensi menjadi sumber emisi gas rumah kaca. Sebaliknya, kotoran ternak yang tidak dikelola dengan baik dapat mencemari lingkungan dan menjadi sumber bau yang mengganggu. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara potensi sumber daya yang tersedia dengan praktik pengelolaan yang berkelanjutan. Padahal, jika kedua subsistem ini diintegrasikan, maka akan terbentuk sinergi yang mampu menutup siklus nutrisi, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, dan pada akhirnya mendorong produktivitas primer lahan pertanian (Li dkk., 2024; Riady dkk., 2024).

Berbagai penelitian terdahulu telah membahas manfaat ekonomi dan sosial dari agrowisata terpadu (Baharudin dkk., 2023; Pham dkk., 2023), namun kajian yang secara spesifik menganalisis aspek sains, khususnya siklus nutrisi dan produktivitas primer dalam sistem integrasi tanaman-ternak, masih sangat terbatas. Padahal, pemahaman mendalam tentang aliran materi dan energi dalam sistem ini sangat penting untuk merancang model pertanian berkelanjutan sekaligus mengidentifikasi

potensinya sebagai sarana edukasi. Penelitian ini menawarkan kebaruan (novelty) dengan memadukan analisis spasial berbasis tipologi wilayah dan analisis ekologis kuantitatif untuk membedah mekanisme siklus nutrisi pada sistem integrasi tanaman-ternak di Konut. Lebih jauh, penelitian ini juga mengkaji bagaimana setiap tipologi kawasan – dengan karakteristik fisik, hayati, dan pengelolaan yang berbeda – dapat dikembangkan menjadi zona edukasi sains yang autentik, di mana masyarakat dan peserta didik dapat belajar langsung tentang prinsip-prinsip ekologi, biogeokimia, dan pertanian ramah lingkungan (Zulgani dkk., 2023; Utama, 2023).

Tujuan penelitian ini adalah: (1) mengidentifikasi tipologi kawasan agrowisata terpadu di Kabupaten Konawe Utara berdasarkan karakteristik fisik, hayati, dan sistem produksi; (2) menganalisis potensi siklus nutrisi (C, N, P, K) yang terbentuk dari interaksi subsistem tanaman dan ternak di setiap tipologi; (3) memperkirakan produktivitas primer dari masing-masing tipologi sebagai indikator efisiensi ekologis; dan (4) merumuskan potensi setiap tipologi sebagai kawasan edukasi sains (laboratorium alam) untuk mendukung pembelajaran biologi, ekologi, dan ilmu lingkungan. Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis bagi pengembangan ilmu ekologi terapan, serta kontribusi praktis bagi pemerintah daerah dan masyarakat dalam merancang kebijakan pengembangan agrowisata yang tidak hanya berorientasi ekonomi, tetapi juga berwawasan lingkungan dan pendidikan.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed-method yang menggabungkan analisis spasial kuantitatif dengan observasi lapangan kualitatif. Pendekatan ini dipilih untuk dapat memetakan tipologi kawasan secara objektif sekaligus memahami dinamika ekologis dan sosial dari sistem integrasi tanaman-ternak yang berlangsung di lapangan (Creswell & Creswell, 2018). Penelitian dilaksanakan di Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara, selama periode Maret hingga November 2024. Lokasi penelitian mencakup seluruh kecamatan yang memiliki potensi pengembangan agrowisata terpadu berdasarkan arahan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Konawe Utara, meliputi Kecamatan Lasolo, Lembo, Molawe, Andowia, Oheo, Motui, dan Wiwirano.

Objek penelitian adalah sistem integrasi tanaman-ternak yang mencakup subsistem tanaman pangan (padi, jagung), perkebunan (kakao, kelapa, cengkih), dan peternakan (sapi, kambing, unggas). Unit analisis utama adalah tipologi kawasan yang dikelompokkan berdasarkan karakteristik fisik (topografi, jenis tanah), hayati (jenis komoditas, pola tanam), dan sistem produksi (skala usaha, tingkat integrasi). Variabel yang diamati meliputi: (1) parameter fisik-kimia lingkungan (jenis tanah, kemiringan lereng, ketinggian tempat, curah hujan); (2) parameter biologis (jenis tanaman, jenis ternak, produktivitas lahan, biomassa limbah); dan (3) parameter pengelolaan (pola integrasi, teknologi pengolahan limbah, pemanfaatan pupuk organik).

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa teknik. Studi literatur dilaksanakan untuk menunjang proses identifikasi dan analisis dengan menelaah studi-studi terdahulu, dokumen kebijakan, serta publikasi statistik dari BPS dan dinas terkait (BPS Konawe Utara, 2023; Dinas Pertanian dan Perkebunan Konawe Utara, 2024). Observasi lapangan dilakukan dengan mengamati langsung objek penelitian pada lokasi-lokasi yang ditetapkan sebagai kawasan pengembangan agrowisata terpadu. Kegiatan observasi meliputi: (1) survei lokasi untuk memverifikasi kondisi eksisting; (2) identifikasi tipologi wilayah dan persentase luasannya; (3) identifikasi sarana dan prasarana

pendukung; serta (4) dokumentasi foto dan video. Pengukuran dan pemetaan menggunakan perangkat Global Positioning System (GPS) untuk mencatat koordinat titik-titik strategis, serta drone/Unmanned Aerial Vehicle (UAV) untuk pengambilan foto udara guna memperoleh gambaran spasial yang akurat. Data spasial sekunder yang digunakan meliputi Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) skala 1:50.000 dan Peta Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Konawe Utara.

Analisis data dilakukan secara bertahap. Analisis spasial menggunakan perangkat lunak ArcGIS dan QGIS untuk mengolah data citra satelit (Landsat, Sentinel) dan peta tematik guna menghasilkan peta tipologi kawasan agrowisata. Proses ini meliputi interpretasi citra, digitasi, dan overlay peta (kemiringan lereng, jenis tanah, tutupan lahan) untuk mengklasifikasikan wilayah ke dalam tipologi yang berbeda. Analisis deskriptif kuantitatif digunakan untuk menghitung potensi biomassa limbah pertanian dan kotoran ternak berdasarkan data luas lahan dan populasi ternak dari masing-masing kecamatan. Perhitungan produktivitas primer diperkirakan dengan pendekatan biomassa tanaman (ton/ha/tahun) yang dikonversi dari data produksi komoditas unggulan. Analisis siklus nutrisi dilakukan secara kualitatif dengan melacak aliran bahan organik dari subsistem tanaman ke ternak (limbah sebagai pakan) dan dari ternak kembali ke tanaman (kotoran sebagai pupuk), serta mengidentifikasi titik-titik efisiensi dan kebocoran dalam siklus tersebut. Seluruh data yang terkumpul kemudian disintesis untuk merumuskan potensi setiap tipologi sebagai kawasan edukasi sains.

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Hasil Penelitian

Tipologi Kawasan Agrowisata Terpadu

Analisis spasial terhadap karakteristik fisik, hayati, dan sistem produksi di Kabupaten Konawe Utara mengidentifikasi empat tipologi kawasan agrowisata terpadu yang masing-masing memiliki potensi ekologis berbeda dalam mendukung siklus nutrisi dan produktivitas primer. Keempat tipologi tersebut dirangkum dalam Tabel 1.

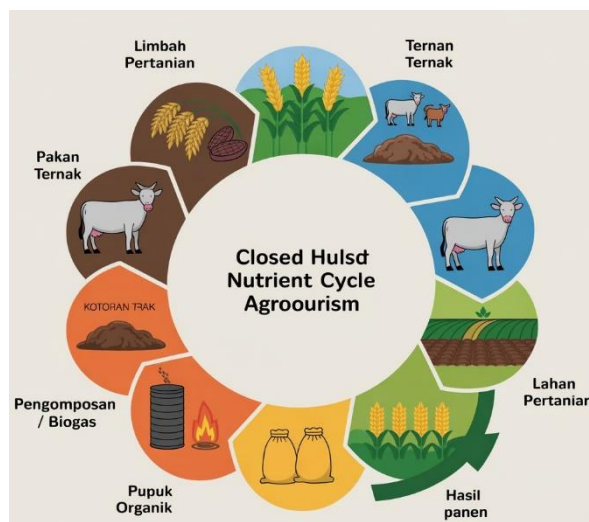
Tabel 1. Tipologi Kawasan Agrowisata Terpadu di Kabupaten Konawe Utara

Tipologi	Kawasan	Luas (%)	Karakteristik Ekologis	Komoditas Unggulan	Potensi Siklus Nutrien
I	Pesisir dan Dataran Aluvial	18	Topografi datar (0-8%), tanah aluvial subur	Kelapa, padi, jagung, perikanan	Limbah kelapa (tempurung, sabut) dan jerami padi untuk pakan ternak; potensi tinggi untuk integrasi dengan ternak ruminansia
II	Perkebunan Dataran Rendah - Bukit Bergelombang	45	Topografi bergelombang (8-25%), tanah ultisol/inseptisol	Kelapa sawit, kakao, cengkih, lada	Limbah perkebunan (pelepah sawit, kulit kakao) melimpah; potensi besar untuk pakan ternak dan kompos; tantangan

Tipologi	Kawasan	Luas (%)	Karakteristik Ekologis	Komoditas Unggulan	Potensi Siklus Nutrien
					pada sistem monokultur
III	Agroforestri dan Konservasi	25	Topografi berbukit (>25%), tanah organik tinggi, ketinggian 300-800 mdpl	Cengkih, kopi, pala, kemiri, madu hutan	Keanekaragaman hayati tinggi; siklus nutrien alami dari serasah hutan; potensi integrasi dengan ternak kambing/ domba sistem cage grazing
IV	Perkebunan Dataran Tinggi dan Lereng Gunung	12	Topografi bergunung (>800 mdpl), suhu sejuk (18-24°C)	Kopi arabika, vanili, sayuran dataran tinggi	Komoditas bernilai tinggi; limbah organik terbatas namun berkualitas; potensi integrasi dengan ternak untuk pupuk organik premium

Model Siklus Nutrien Terintegrasi

Hasil observasi lapangan dan analisis sistem produksi menunjukkan bahwa integrasi tanaman-ternak di Kabupaten Konawe Utara membentuk siklus nutrien tertutup (closed-loop nutrient cycle) yang melibatkan aliran bahan organik antara subsistem tanaman dan ternak. Siklus ini digambarkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Siklus Nutrien Tertutup dari Limbah Pertanian, Ternak, Pengomposan, hingga Kembali ke Lahan

Berdasarkan data luas lahan dan populasi ternak dari masing-masing tipologi, diperkirakan potensi biomassa limbah pertanian yang dapat didaur ulang mencapai 156.000 ton per tahun, yang

terdiri dari jerami padi (42%), kulit kakao (28%), pelepah sawit (18%), dan limbah lainnya (12%). Sementara itu, potensi kotoran ternak mencapai 85.000 ton per tahun, yang jika dikonversi menjadi pupuk organik setara dengan 21.000 ton pupuk NPK organik, cukup untuk memenuhi kebutuhan hara 60% lahan pertanian di Kabupaten Konawe Utara.

Produktivitas Primer Berdasarkan Tipologi

Estimasi produktivitas primer (biomassa tanaman) dari masing-masing tipologi disajikan dalam Tabel 2. Produktivitas primer tertinggi terdapat pada Tipologi II (Perkebunan Dataran Rendah) dengan rata-rata 28,5 ton biomassa/ha/thn, disumbang terutama oleh produktivitas kelapa sawit dan kakao. Namun, dari sisi efisiensi ekologis (rasio output terhadap input eksternal), Tipologi III (Agroforestri) menunjukkan nilai tertinggi karena rendahnya ketergantungan pada pupuk kimia dan pestisida.

Tabel 2. Estimasi Produktivitas Primer dan Efisiensi Ekologis per Tipologi

Tipologi	Produktivitas Primer (ton biomassa/ha/thn)	Input Pupuk Kimia (kg/ha/thn)	Rasio Efisiensi Ekologis*	Potensi sebagai Laboratorium Alam
I	18,2	350	0,052	Sedang: Demonstrasi integrasi pesisir-darat
II	28,5	550	0,052	Rendah: Monokultur, biodiversitas terbatas
III	15,8	120	0,132	Tinggi: Agroforestri, biodiversitas tinggi, siklus alami
IV	12,4	180	0,069	Tinggi: Komoditas premium, iklim sejuk, sistem organik

Keterangan: Rasio efisiensi ekologis = produktivitas primer / input pupuk kimia (semakin tinggi nilai, semakin efisien secara ekologis)

Pembahasan

Makna Ekologis Siklus Nutrien Tertutup

Temuan utama penelitian ini adalah teridentifikasinya siklus nutrien tertutup pada sistem integrasi tanaman-ternak di Kabupaten Konawe Utara. Siklus ini merepresentasikan aplikasi nyata dari prinsip ekologi tentang aliran energi dan daur materi dalam suatu ekosistem (Odum & Barrett, 2005). Dalam kerangka sains, fenomena ini dapat dijelaskan melalui konsep biogeokimia, di mana unsur-unsur esensial seperti karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) bergerak secara siklik dari komponen biotik ke abiotik dan kembali lagi ke biotik (Chapin dkk., 2011).

Proses konversi limbah pertanian menjadi pakan ternak merupakan bentuk pemanfaatan energi yang tersimpan dalam biomassa yang tidak terpakai. Jerami padi yang biasanya dibakar – melepaskan CO₂ ke atmosfer dan kehilangan seluruh potensi energinya – dalam sistem ini dialihkan menjadi sumber

pakan berserat untuk ternak ruminansia. Hal ini sejalan dengan temuan Wang dkk. (2023) yang menyatakan bahwa integrasi tanaman-ternak dapat meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya hingga 30-40% dibandingkan sistem terpisah. Lebih lanjut, konversi kotoran ternak menjadi pupuk organik melalui proses dekomposisi dan mineralisasi mengembalikan unsur hara ke tanah, menutup siklus yang semula terbuka (Li dkk., 2024).

Efisiensi Ekologis dan Implikasinya terhadap Produktivitas Primer

Temuan bahwa Tipologi III (Agroforestri) memiliki rasio efisiensi ekologis tertinggi (0,132) meskipun produktivitas primernya lebih rendah dari Tipologi II memiliki implikasi penting. Hal ini menunjukkan bahwa produktivitas tinggi yang dicapai melalui input pupuk kimia besar (seperti pada Tipologi II) tidak serta-merta mencerminkan kesehatan ekosistem jangka panjang. Sebaliknya, sistem agroforestri dengan input luar rendah namun mampu mempertahankan produktivitas stabil menunjukkan resiliensi ekologis yang lebih baik (Ammirato dkk., 2020; Djuwendah dkk., 2023).

Dalam perspektif produktivitas primer, sistem integrasi tanaman-ternak berpotensi meningkatkan produktivitas lahan melalui efek sinergis. Pupuk organik dari kotoran ternak tidak hanya menyuplai unsur hara makro (N, P, K) tetapi juga memperbaiki sifat fisik tanah seperti struktur, porositas, dan kapasitas menahan air (Han dkk., 2020). Perbaikan kualitas tanah ini pada gilirannya akan mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih optimal, meningkatkan biomassa yang dihasilkan per satuan luas. Penelitian Riady dkk. (2024) di Sumatera Utara menunjukkan bahwa penerapan integrasi tanaman-ternak mampu meningkatkan produktivitas lahan sawit sebesar 15-20% setelah tiga tahun aplikasi pupuk organik secara konsisten.

Potensi Pengembangan Kawasan Edukasi Sains

Implikasi paling strategis dari temuan penelitian ini adalah potensi pengembangan setiap tipologi sebagai kawasan edukasi sains (laboratorium alam). Tipologi III (Agroforestri) dengan keanekaragaman hayati tinggi dan siklus nutrisi alami yang kompleks sangat cocok untuk pembelajaran tentang ekologi komunitas, interaksi interspesifik, dan jasa ekosistem (Jumiyati & Frimawaty, 2023). Siswa dan mahasiswa dapat melakukan praktik lapangan seperti analisis vegetasi dengan metode kuadrat, pengukuran biomassa, identifikasi fauna tanah, serta pengamatan proses dekomposisi serasah.

Tipologi IV (Perkebunan Dataran Tinggi) dengan komoditas premium dan praktik pertanian yang mendekati organik menawarkan peluang pembelajaran tentang adaptasi tanaman terhadap ketinggian, pengaruh iklim mikro terhadap kualitas hasil panen, serta teknologi pascapanen seperti fermentasi kopi dan curing vanili (Utama, 2023). Sementara itu, Tipologi I (Pesisir) dapat dimanfaatkan untuk mempelajari ekosistem estuari, integrasi pertanian dengan perikanan tambak, serta dinamika nutrisi dari darat ke laut.

Yang tidak kalah penting, model siklus nutrisi tertutup yang teridentifikasi dapat menjadi wahana pembelajaran tentang konsep abstrak dalam biologi seperti siklus biogeokimia, aliran energi, dan hukum kekekalan materi (Zulgani dkk., 2023). Dengan mengamati langsung bagaimana limbah pertanian yang semula dianggap tidak berguna justru menjadi sumber daya berharga dalam sistem terintegrasi, peserta didik dapat menginternalisasi nilai-nilai keberlanjutan dan kearifan ekologis.

Kebaruan dan Kontribusi Penelitian

Kebaruan penelitian ini terletak pada upaya memadukan analisis spasial berbasis tipologi wilayah dengan analisis ekologis kuantitatif untuk membedah mekanisme siklus nutrisi dalam sistem integrasi tanaman-ternak. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih banyak berfokus pada aspek ekonomi dan sosial agrowisata (Baharudin dkk., 2023; Pham dkk., 2023), penelitian ini secara eksplisit mengkaji dimensi sains dari sistem tersebut. Hasilnya tidak hanya memberikan pemahaman tentang bagaimana siklus nutrisi bekerja di lapangan, tetapi juga merumuskan potensi setiap tipologi sebagai sumber belajar sains yang autentik.

Kontribusi penelitian ini bagi pengembangan ilmu, khususnya dalam bidang pendidikan sains, adalah tersedianya model pengembangan kawasan edukasi berbasis potensi lokal yang terintegrasi. Model ini dapat direplikasi di daerah lain dengan karakteristik serupa, sekaligus menjadi acuan bagi pemerintah daerah dalam merancang kebijakan pengembangan agrowisata yang tidak hanya berorientasi ekonomi tetapi juga berwawasan lingkungan dan pendidikan.

Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengidentifikasi empat tipologi kawasan agrowisata terpadu di Kabupaten Konawe Utara yang masing-masing memiliki karakteristik ekologis berbeda, meliputi Kawasan Pesisir dan Dataran Aluvial (Tipologi I), Perkebunan Dataran Rendah – Bukit Bergelombang (Tipologi II), Agroforestri dan Konservasi (Tipologi III), serta Perkebunan Dataran Tinggi dan Lereng Gunung (Tipologi IV). Perbedaan karakteristik fisik, hayati, dan sistem produksi antar tipologi ini menghasilkan variasi dalam potensi siklus nutrisi dan produktivitas primer yang dapat dioptimalkan untuk pengembangan kawasan edukasi sains.

Analisis terhadap sistem integrasi tanaman-ternak di wilayah studi mengungkapkan adanya siklus nutrisi tertutup yang secara ekologis sangat efisien. Limbah pertanian seperti jerami padi, kulit kakao, dan pelepah sawit yang selama ini terbuang ternyata memiliki potensi besar sebagai pakan ternak, sementara kotoran ternak dapat dikonversi menjadi pupuk organik yang mengembalikan unsur hara esensial (C, N, P, K) ke lahan pertanian. Estimasi kuantitatif menunjukkan potensi biomassa limbah pertanian mencapai 156.000 ton per tahun dan potensi kotoran ternak 85.000 ton per tahun, yang setara dengan 21.000 ton pupuk NPK organik. Siklus ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada input eksternal seperti pupuk kimia, tetapi juga meningkatkan efisiensi ekologis sistem pertanian secara keseluruhan.

Produktivitas primer tertinggi secara absolut ditemukan pada Tipologi II (28,5 ton biomassa/ha/tahun) berkat dominasi perkebunan kelapa sawit dan kakao. Namun, dari perspektif efisiensi ekologis (rasio produktivitas terhadap input pupuk kimia), Tipologi III (Agroforestri) menunjukkan kinerja terbaik dengan nilai 0,132, mengindikasikan resiliensi dan keberlanjutan yang lebih tinggi dibandingkan sistem monokultur intensif. Temuan ini menegaskan bahwa produktivitas tinggi belum tentu mencerminkan kesehatan ekosistem jangka panjang.

Implikasi paling strategis dari penelitian ini adalah teridentifikasinya potensi setiap tipologi sebagai kawasan edukasi sains atau laboratorium alam. Tipologi III dengan keanekaragaman hayati tinggi dan siklus nutrisi alami yang kompleks sangat ideal untuk pembelajaran ekologi komunitas dan jasa ekosistem. Tipologi IV menawarkan peluang pembelajaran tentang adaptasi tanaman terhadap

ketinggian dan teknologi pascapanen komoditas premium. Tipologi I dapat dimanfaatkan untuk mempelajari ekosistem estuari dan integrasi darat-laut. Sementara Tipologi II, meskipun memiliki keterbatasan dari sisi keanekaragaman hayati, tetap dapat digunakan untuk demonstrasi teknologi perkebunan modern dan pengelolaan limbah industri. Dengan demikian, Kabupaten Konawe Utara tidak hanya memiliki potensi ekonomi sebagai destinasi agrowisata, tetapi juga potensi strategis sebagai pusat pembelajaran sains berbasis kearifan ekologis lokal yang dapat mendukung pengembangan pendidikan berkelanjutan di Indonesia.

Referensi

- Ammirato, S., Felicetti, A. M., Raso, C., Pansera, B. A., & Violi, A. (2020). Agritourism and sustainability: What we can learn from a systematic literature review. *Sustainability*, 12(22), 9575. <https://doi.org/10.3390/su12229575>
- Baharudin, N., Jaafar, M. N., Ismail, A., Azis, S. S. A., & Afrane, E. (2023). Aligning Malaysian agrotourism real estate investment with the sustainable development goals: Opportunities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1274(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1274/1/012030>
- BPS Konawe Utara. (2023). *Kabupaten Konawe Utara dalam angka 2023*. Badan Pusat Statistik Kabupaten Konawe Utara.
- Chapin, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (2nd ed.). Springer.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Dinas Pertanian dan Perkebunan Konawe Utara. (2024). *Data luas areal dan produksi komoditas perkebunan Kabupaten Konawe Utara tahun 2024*. Pemerintah Kabupaten Konawe Utara.
- Djuwendah, E., Karyani, T., Wulandari, E., & Pradono, P. (2023). Community-based agro-ecotourism sustainability in West Java, Indonesia. *Sustainability*, 15(13), 10432. <https://doi.org/10.3390/su151310432>
- Han, G., Akhmedov, A., Li, H., Yu, J., & Hunter, W. C. (2020). An interpretive study on sustainability in the link between agriculture and tourism: Tourist-stakeholder satisfaction in Tiantangzhai, China. *Sustainability*, 12(2), 571. <https://doi.org/10.3390/su12020571>
- Jumiyati, S., & Frimawaty, E. (2023). The development of an edu-agrotourism concept in the buffer zone of conservation area based on education and local community empowerment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1275(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1275/1/012027>
- Li, Z., Wang, Y., Wang, L., Xu, L., Chen, H., & Yao, C. (2024). Study on the impact of rural tourism construction projects on farmers' livelihood capital and livelihood options. *Agriculture*, 14(7), 1024. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071024>
- Mistriani, N., Ihalauw, J. J., & Priyanto, S. H. (2024). Three main pillars of agrotourism success in Lerep Tourism Village: Farmer groups, Pokdarwis, and BUMDes. *ICGTSAVE*, 1(2), 99-112. <https://doi.org/10.62951/icgtsave.v1i2.31>

- Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2005). *Fundamentals of ecology* (5th ed.). Thomson Brooks/Cole.
- Pham, T., Cao, H. S., & Lapointe, D. (2023). Agrotourism and fast urbanisation: The double pressure of development on peri-urban agriculture in Hoi An, a small city of Central Vietnam. *Asia Pacific Viewpoint*, 64(3), 408-424. <https://doi.org/10.1111/apv.12381>
- Riady, I., Hasyim, S., Purwoko, A., Lubis, S. N., & Charloq. (2024). Development model of sustainable agrotourism-based village tourism for improving community welfare in Tapanuli Utara Regency, Indonesia. *Journal of Ecohumanism*, 3(7), 1309-1324. <https://doi.org/10.62754/joe.v3i7.4291>
- Setyowati, R., Lestari, E. P., Rusdiyana, E., Sugihardjo, Widiyanto, W., & Maharani, R. (2024). The role of women in agrotourism development: Gender analysis (Case study of Ngargoyoso District). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1362(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1362/1/012034>
- Utama, I. G. B. R. (2023). Review studies key element of agrotourism management. *Prosiding Seminar Nasional FMI*, 1, 169-180. <https://doi.org/10.47747/snfmi.v1i.1497>
- Wang, J., Xia, L., Zhou, F., Chen, C., & Zhu, Q. (2023). Impacts of the integrated development of agriculture and tourism on sustainable development of agriculture – Based on provincial data of China from 2008 to 2019. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(4), 3825-3843. <https://doi.org/10.15244/pjoes/163566>
- Zulgani, Z., Junaidi, J., Hastuti, D., Rustiadi, E., Pravitasari, A. E., & Asfahani, F. R. (2023). Understanding the emergence of rural agrotourism: A study of influential factors in Jambi Province, Indonesia. *Economies*, 11(7), 180. <https://doi.org/10.3390/economies11070180>