

**KOMPENSASI STRUKTURAL DAN NILAI EKONOMI: BAGAIMANA
SISTEM AGROFORESTRI TRADISIONAL MEMPERTAHANKAN
KEANEKARAGAMAN HAYATI DI HOTSPOT WALLACEA SULAWESI**

***Structural Compensation and Economic Value: How Traditional Agroforestry Systems
Maintain Biodiversity in Sulawesi's Wallacea Hotspot***

**Abdul Samad Hiola^{1*)}, Dewi Wahyuni K. Baderan², Marini Susanti Hamidun³,
Sukirman Rahim⁴, Asda Rauf⁴**

¹⁾ Doctoral Program in Environmental Science, Gorontalo State University, Gorontalo,
96127

^{2,3,4)} Post Graduate Program, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, 96127
e-mail: shiola@unigo.ac.id

Abstract

This study analyzed the trade-offs and synergies between economic productivity and biodiversity conservation across different land-use systems in Sulawesi, Indonesia. NMDS analysis revealed significant differentiation in species composition across systems (PERMANOVA, $F=12.34$, $p<0.001$). Natural forests were characterized by a high proportion of endemic species such as *Agathis robusta*, *Molonggoile* spp., and *Biamenga* spp., while agroforestry systems were dominated by economically valuable species such as *Aleurites moluccanus* (candlenut), *Arenga pinnata* (sugar palm), and *Durio zibethinus* (durian). Economic valuation revealed substantial differences in value per hectare: candlenut agroforestry (USD 2,115), sugar palm agroforestry (USD 1,785), durian agroforestry (USD 1,627), plantation forests (USD 895), and natural forests (USD 327). The analysis revealed a negative correlation between species richness and economic value ($r=-0.87$, $p<0.05$), but a positive correlation between tree density and economic value ($r=0.79$, $p<0.05$). Redundancy analysis identified basal area and tree density as the most influential vegetation structure parameters on species composition patterns ($R^2=0.68$, $p<0.001$). The agroforestry system maintained basal area through higher densities of smaller trees, suggesting a structural compensation mechanism. These findings demonstrate that management intensification for economic species reduces species richness while maintaining structural parameters that support ecological functions. Structural compensation mechanisms in agroforestry provide an effective strategy for maintaining biodiversity in tropical landscapes under deforestation pressure, while highlighting the potential of an integrated approach to balancing conservation and sustainable development in the Wallacea hotspot.

Keywords: Agroforestry; Biodiversity conservation; Wallacea hotspot; Economic valuation; Sulawesi

Abstrak

Penelitian ini menganalisis trade-off dan sinergi antara produktivitas ekonomi dan konservasi keanekaragaman hayati pada berbagai sistem penggunaan lahan di Sulawesi, Indonesia. Analisis NMDS menunjukkan diferensiasi komposisi spesies yang signifikan antarsistem (PERMANOVA, $F=12,34$, $p<0,001$). Hutan alami dicirikan oleh proporsi tinggi spesies endemik seperti *Agathis robusta*, *Molonggoile* spp., dan *Biamenga* spp., sedangkan sistem

agroforestri didominasi spesies bernilai ekonomi seperti *Aleurites moluccanus* (kemiri), *Arenga pinnata* (aren), dan *Durio zibethinus* (durian). Valuasi ekonomi mengungkapkan perbedaan substansial nilai per hektare: agroforestri kemiri (USD 2.115), agroforestri aren (USD 1.785), agroforestri durian (USD 1.627), hutan tanaman (USD 895), dan hutan alami (USD 327). Analisis menunjukkan korelasi negatif antara kekayaan spesies dan nilai ekonomi ($r=-0,87$, $p<0,05$), namun korelasi positif antara kepadatan pohon dan nilai ekonomi ($r=0,79$, $p<0,05$). Analisis redundansi mengidentifikasi luas bidang dasar dan kepadatan pohon sebagai parameter struktur vegetasi paling berpengaruh terhadap pola komposisi spesies ($R^2=0,68$, $p<0,001$). Sistem agroforestri mempertahankan luas bidang dasar melalui kepadatan lebih tinggi dari pohon berukuran lebih kecil, menunjukkan mekanisme kompensasi struktural. Temuan ini membuktikan bahwa intensifikasi pengelolaan untuk spesies ekonomi menurunkan kekayaan spesies namun mempertahankan parameter struktural yang mendukung fungsi ekologis. Mekanisme kompensasi struktural pada agroforestri memberikan strategi efektif untuk menjaga keanekaragaman hayati di lanskap tropis yang mengalami tekanan deforestasi, sekaligus menegaskan potensi pendekatan terintegrasi dalam menyeimbangkan konservasi dan pembangunan berkelanjutan di hotspot Wallacea.

Kata kunci: Agroforestri; Konservasi keanekaragaman hayati; Hotspot Wallacea; Valuasi ekonomi; Sulawesi

PENDAHULUAN

Agroforestri telah diakui sebagai strategi penting dalam menjembatani kebutuhan ekonomi masyarakat dengan upaya konservasi keanekaragaman hayati di lanskap tropis. Berbagai penelitian telah mendokumentasikan potensi sistem agroforestri dalam konservasi keanekaragaman hayati pada wilayah tropis. Di Afrika, penelitian di zona Savana Guinea, Ghana, menunjukkan bahwa praktik agroforestri tradisional mempertahankan keragaman tumbuhan yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan sistem monokultur, terutama untuk spesies tumbuhan obat (Yeboah et al., 2022). Demikian pula, studi di Etiopia menemukan bahwa sistem agroforestri tradisional berbasis kopi mendukung 60–80% spesies pohon yang ditemukan pada hutan alami di sekitarnya, sekaligus menyediakan pendapatan penting bagi petani kecil (Tadesse et al., 2021). Di Amerika Latin, sistem kopi dan kakao bernaungan terbukti menampung keragaman burung dan serangga yang substansial serta berfungsi sebagai refugia penting bagi spesies bergantung hutan (Lacerda et al., 2023). Di Asia Tenggara, penelitian pada sistem agroforestri karet di Sumatra menunjukkan tingkat keragaman pohon sedang dan potensi penyimpanan karbon yang signifikan, sehingga mengindikasikan kontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim sekaligus dukungan bagi penghidupan pedesaan (Latifah, 2022). Secara keseluruhan, temuan tersebut mengindikasikan bahwa sistem agroforestri dapat mempertahankan tingkat keanekaragaman hayati yang bermakna secara ekologis, meskipun hasil konservasi spesifiknya bervariasi.

Di Indonesia, beberapa penelitian menunjukkan bahwa praktik agroforestri tradisional berkontribusi terhadap

sekuestrasi karbon tanah dan mempertahankan tingkat keragaman pohon yang sedang (Idris, 2021). Namun, sebagian besar riset tersebut berfokus pada Jawa atau Sumatra, sedangkan perhatian terhadap Indonesia bagian timur—terutama Sulawesi—masih terbatas, padahal wilayah ini merupakan hotspot keanekaragaman hayati yang penting dengan karakter biogeografi yang unik (Khairunnisa, 2024). Studi yang tersedia di Sulawesi umumnya menelaah satu aspek tertentu, misalnya penyimpanan karbon atau nilai ekonomi, tanpa memberikan penilaian komprehensif atas dimensi ekologis dan ekonomi (Tamnge et al., 2024). Selain itu, analisis komparatif antara sistem agroforestri dan penggunaan lahan lain, termasuk hutan alami dan hutan tanaman, masih jarang dilakukan; akibatnya, pemahaman mengenai nilai konservasi relatif dari beragam pendekatan pengelolaan lahan di wilayah ini menjadi terbatas (Hailu, 2021). Sebagian besar riset yang ada cenderung berfokus sempit pada parameter ekologis atau manfaat ekonomi, tanpa mengintegrasikan kedua dimensi tersebut untuk menilai keberlanjutan keseluruhan sistem agroforestri (Mada, 2023). Pemahaman mengenai variasi struktur vegetasi, keanekaragaman spesies, dan nilai ekonomi pada berbagai sistem agroforestri serta perbandingannya dengan hutan alami dan hutan tanaman masih terbatas (Tebkew et al., 2023).

Penelitian ini dilakukan di wilayah hotspot keanekaragaman hayati Wallacea, Sulawesi, Indonesia, yang dikenal memiliki tingkat endemisme yang luar biasa serta penting dari sisi konservasi (Thakur et al., 2021). Sehubungan dengan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan melalui analisis komparatif yang komprehensif mengenai keanekaragaman pohon, struktur vegetasi, dan nilai ekonomi pada lima sistem

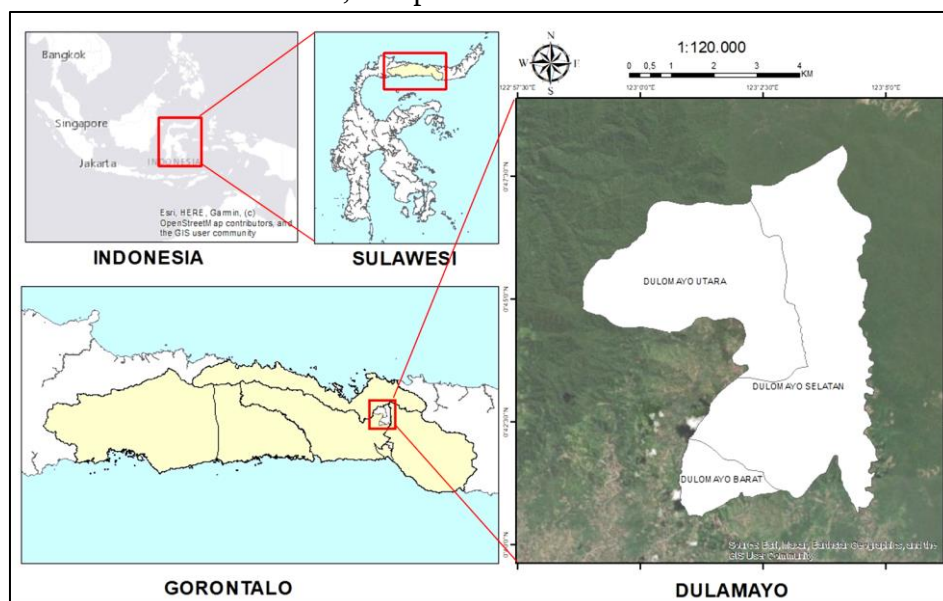
penggunaan lahan di Sulawesi, mencakup hutan alami, hutan tanaman, serta tiga tipe sistem agroforestri petani kecil; tujuan penelitian ini adalah: (1) mengkuantifikasi perbedaan keanekaragaman spesies, struktur vegetasi, dan nilai ekonomi antarsistem penggunaan lahan; (2) menilai kontribusi sistem agroforestri terhadap konservasi keanekaragaman hayati regional; serta (3) mengevaluasi potensi agroforestri dalam menyeimbangkan tujuan ekologis dan ekonomi pada lanskap tropis.

METODE PENELITIAN

a. Wilayah Studi dan Pemilihan Lokasi

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah hotspot keanekaragaman hayati Wallacea, Sulawesi, Indonesia, khususnya pada kawasan hutan lindung Dulamayo yang berada di Desa Dulamayo Selatan, Dulamayo Utara, dan Dulamayo Barat. Wilayah ini dikenal memiliki tingkat endemisme yang luar biasa serta penting dari sisi konservasi (Thakur et al., 2021). Lokasi penelitian dipilih secara strategis pada gradasi sistem penggunaan lahan yang representatif di Provinsi Gorontalo, tempat

praktik agroforestri tradisional telah dipertahankan lintas generasi meskipun tekanan intensifikasi pertanian semakin meningkat (Hiola, 2024). Lima sistem penggunaan lahan dimasukkan dalam analisis komparatif, yaitu hutan alami (hutan primer terlindungi), hutan tanaman (perkebunan kayu), serta tiga tipe sistem agroforestri petani kecil (berbasis kemiri, berbasis aren, dan berbasis durian) yang merepresentasikan intensitas pengelolaan serta orientasi ekonomi yang berbeda (Latifah, 2022). Pemilihan lokasi mengikuti pendekatan pengambilan sampel acak berstrata untuk memastikan keterwakilan gradien elevasi (300–800 m dpl) dan tipe tanah, sekaligus meminimalkan variabel lingkungan perancu (Ndao, 2021). Setiap sistem penggunaan lahan direplikasi pada enam lokasi, sehingga total terdapat tiga puluh lokasi penelitian. Seluruh lokasi dinilai pada musim kemarau tahun 2024 untuk meminimalkan pengaruh variasi musiman terhadap parameter vegetasi, sesuai protokol baku pada studi vegetasi tropis komparatif (Mankou et al., 2021).



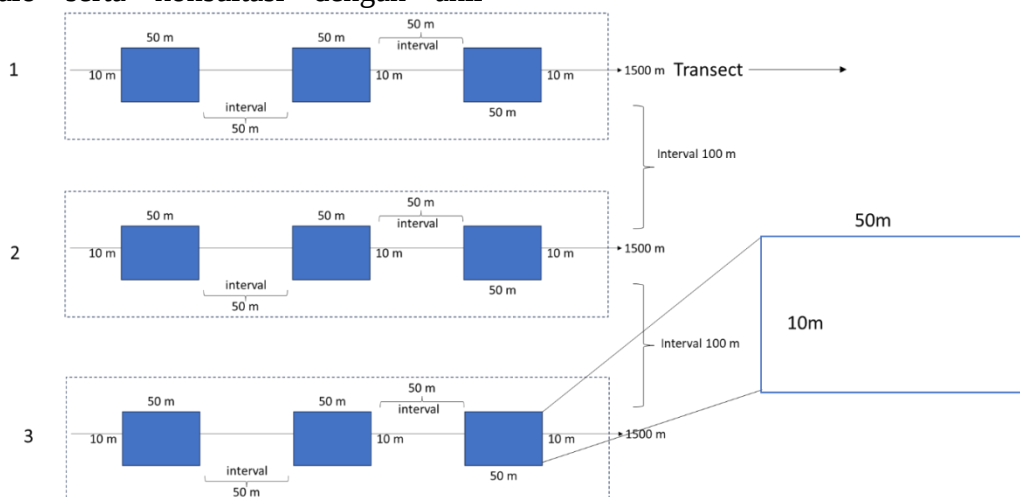
Gambar 1. Peta Lanskap Dulamayo, Provinsi Gorontalo, Indonesia

b. Pengambilan Sampel dan Pengumpulan Data Vegetasi

Data vegetasi dikumpulkan dengan metode transek garis sistematis yang

diadaptasi dari protokol penilaian ekologi standar untuk lanskap tropis (Pato et al., 2022). Pada setiap lokasi penelitian, tiga transek paralel berukuran 50×10 m ditetapkan, sehingga luas sampel total sebesar 1.500 m^2 per replikasi sistem penggunaan lahan (enam lokasi $\times$ tiga transek). Intensitas sampling tersebut ditetapkan melalui studi pendahuluan yang mengonfirmasi keterwakilan komposisi spesies sekaligus kelayakan penerapannya di lapangan (Rafdinal, 2021). Seluruh tumbuhan berkayu dengan diameter setinggi dada (DBH) ≥ 5 cm diidentifikasi hingga tingkat spesies, diukur DBH-nya, dan dicatat tingginya. Identifikasi spesies diverifikasi melalui perbandingan dengan spesimen herbarium di Herbarium Universitas Gorontalo serta konsultasi dengan ahli

botani lokal; identifikasi yang meragukan dikonfirmasi melalui teknik pengodean batang molekuler (molecular barcoding) (Amru, 2023). Pengukuran tinggi pohon dilakukan menggunakan hipsometer Vertex IV, dengan pengukuran dari beberapa sudut untuk memastikan akurasi pada struktur tajuk yang kompleks yang lazim pada sistem agroforestri (Miettinen et al., 2021). Protokol sampling difokuskan pada pohon dan semak besar yang membentuk kerangka struktural setiap sistem penggunaan lahan, sesuai metodologi yang telah ditetapkan untuk analisis vegetasi komparatif pada lanskap tropis yang heterogen (Hartoyo et al., 2023).



Gambar 2. Konfigurasi petak sampling

c. Analisis Struktur Vegetasi dan Keanekaragaman

Struktur vegetasi dikarakterisasi menggunakan metrik ekologi standar, meliputi kepadatan pohon (batang per hektare), luas bidang dasar (m^2 per hektare), sebaran tinggi, serta sebaran kelas diameter (Mankou et al., 2021). Luas bidang dasar dihitung menggunakan rumus $BA = \pi \times (DBH/2)^2$, kemudian diagregasi pada tingkat petak untuk memungkinkan perbandingan antarsistem (Yousefi, 2020).

Keanekaragaman spesies diquantifikasi menggunakan beberapa indeks yang saling melengkapi untuk menangkap dimensi keanekaragaman yang berbeda, yakni indeks Shannon–Wiener (H') untuk kekayaan dan kemerataan spesies, indeks keanekaragaman Simpson (D) untuk dominansi, serta indeks kemerataan Pielou (J) untuk menilai kesetaraan sebaran spesies (Pavoine, 2020). Keragaman beta (β -diversity) dianalisis menggunakan ukuran keragaman beta Whittaker untuk menilai pergantian komposisi antarsistem penggunaan lahan,

sesuai protokol penilaian keanekaragaman hayati skala lanskap (Laliberté, 2020). Selain itu, keanekaragaman alfa (α) dihitung pada tingkat petak dan keanekaragaman gama (γ) pada tingkat lanskap untuk menentukan proporsi keragaman regional yang dipertahankan dalam setiap sistem penggunaan lahan (Gregorius, 2020). Dengan demikian, pendekatan multidimensi ini memberikan pemahaman komprehensif mengenai kontribusi berbagai sistem penggunaan lahan terhadap pola keanekaragaman hayati regional, selaras dengan rekomendasi penilaian ekologi yang robust pada lanskap heterogen (Lamy, 2021).

d. Valuasi Ekonomi Spesies Pohon

Untuk mengevaluasi dimensi ekonomi keanekaragaman pohon, penilaian komprehensif terhadap nilai pasar seluruh spesies pohon yang tercatat pada tiap sistem penggunaan lahan dilakukan (Lacerda et al., 2023). Harga pasar dikumpulkan melalui wawancara terstruktur dengan 120 pedagang, pengolah, dan konsumen lokal pada tiga pusat pasar utama di wilayah studi; harga tersebut diverifikasi melalui perbandingan dengan layanan penyuluhan pertanian regional dan basis data harga komoditas (Hernandez, 2022). Untuk setiap spesies pohon, nilai ekonomi potensial per hektare dihitung berdasarkan harga pasar terkini untuk produk utama (misalnya buah, kacang, kayu) dan produk sekunder (misalnya resin, senyawa obat) (Indriyani, 2024). Spesies endemik dan dilindungi diberikan skor nilai konservasi berdasarkan status Daftar Merah IUCN dan status perlindungan nasional, mengikuti protokol baku untuk valuasi nonpasar keanekaragaman hayati (Soares, 2023). Melalui pendekatan penilaian ganda—yakni penggabungan valuasi ekonomi berbasis pasar dan valuasi ekologi berbasis

konservasi—kerangka komprehensif untuk menilai trade-off serta sinergi antara manfaat ekonomi dan konservasi keanekaragaman hayati pada berbagai sistem penggunaan lahan dapat disediakan (Bátori et al., 2023). Metode valuasi ekonomi dirancang untuk menangkap potensi pembangkitan pendapatan segera sekaligus keberlanjutan ekonomi jangka panjang, sehingga menjawab kesenjangan penting pada penilaian agroforestri sebelumnya yang kerap berfokus sempit pada keuntungan ekonomi jangka pendek (Bardsley et al., 2022).

e. Analisis Statistik

Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik R (versi 4.3.0), dengan analisis ekologi khusus dijalankan menggunakan paket vegan untuk ekologi komunitas (Oksanen et al., 2020). Sebelum analisis, normalitas data diuji menggunakan uji Shapiro–Wilk dan homogenitas ragam diuji menggunakan uji Levene (Zhang et al., 2020). Untuk membandingkan metrik struktur vegetasi dan keanekaragaman antarlima sistem penggunaan lahan, analisis ragam satu arah (ANOVA) diterapkan, diikuti uji lanjut Tukey HSD untuk perbandingan berpasangan (Pato et al., 2022). Apabila asumsi normalitas atau homogenitas ragam tidak terpenuhi, uji nonparametrik Kruskal–Wallis digunakan. Perbedaan komposisi spesies dianalisis menggunakan penskalaan multidimensi non-metrik (NMDS) berbasis matriks ketakmiripan Bray–Curtis, dengan signifikansi pemisahan kelompok dinilai melalui PERMANOVA (analisis ragam multivariat permutasi) (Laliberté, 2020). Untuk menelaah hubungan antara nilai ekonomi dan metrik keanekaragaman hayati, koefisien korelasi peringkat Spearman dihitung karena sesuai untuk data ekologi yang tidak berdistribusi normal (Neel,

2021). Selain itu, analisis redundansi (RDA) dilakukan untuk mengidentifikasi faktor lingkungan dan pengelolaan yang paling kuat terkait dengan pola komposisi spesies antarsistem penggunaan lahan (Riva, 2024). Seluruh pengujian dilakukan pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, dengan koreksi yang sesuai untuk perbandingan berganda apabila diperlukan (Markham, 2023). Dengan demikian, pendekatan analitis ini dirancang untuk menyediakan bukti yang kuat mengenai dimensi ekologis dan ekonomi dari berbagai sistem penggunaan lahan, sejalan dengan tujuan ganda konservasi keanekaragaman hayati dan dukungan penghidupan yang menjadi inti pengelolaan lanskap berkelanjutan di wilayah tropis (Wang, 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Struktur Vegetasi dan Keanekaragaman pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan

Berdasarkan penilaian komprehensif, perbedaan yang signifikan pada struktur vegetasi ditemukan di antara lima sistem penggunaan lahan yang diteliti di Sulawesi (Tabel 1). Hutan alami menunjukkan tinggi pohon rata-rata tertinggi ($13,34 \pm 1,21$ m) dan variasi tinggi terbesar, yang mencerminkan stratifikasi vertikal yang kompleks. Sebaliknya, sistem agroforestri menunjukkan tinggi rata-rata lebih rendah ($7,56 \pm 0,83$ m), namun luas bidang dasar yang sebanding dengan hutan alami tetap dipertahankan ($21,2 \pm 1,45$ m²/ha vs. $20,4 \pm 1,32$ m²/ha), sehingga mengindikasikan potensi penyimpanan karbon yang serupa meskipun organisasi strukturalnya berbeda. Secara khusus, kepadatan pohon pada sistem agroforestri terbukti secara signifikan lebih tinggi ($248 \pm 15,3$ pohon/ha) dibandingkan hutan alami ($198 \pm 12,7$ pohon/ha) dan hutan tanaman ($215 \pm 13,8$ pohon/ha) ($p <$

$0,01$), yang menunjukkan mekanisme kompensasi terhadap ukuran individu pohon yang lebih kecil. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang mendokumentasikan hubungan kepadatan–luas bidang dasar yang serupa pada sistem agroforestri di Afrika, sehingga mengindikasikan karakteristik struktural yang berpotensi bersifat umum pada lanskap pertanian berpohon yang dikelola dengan baik.

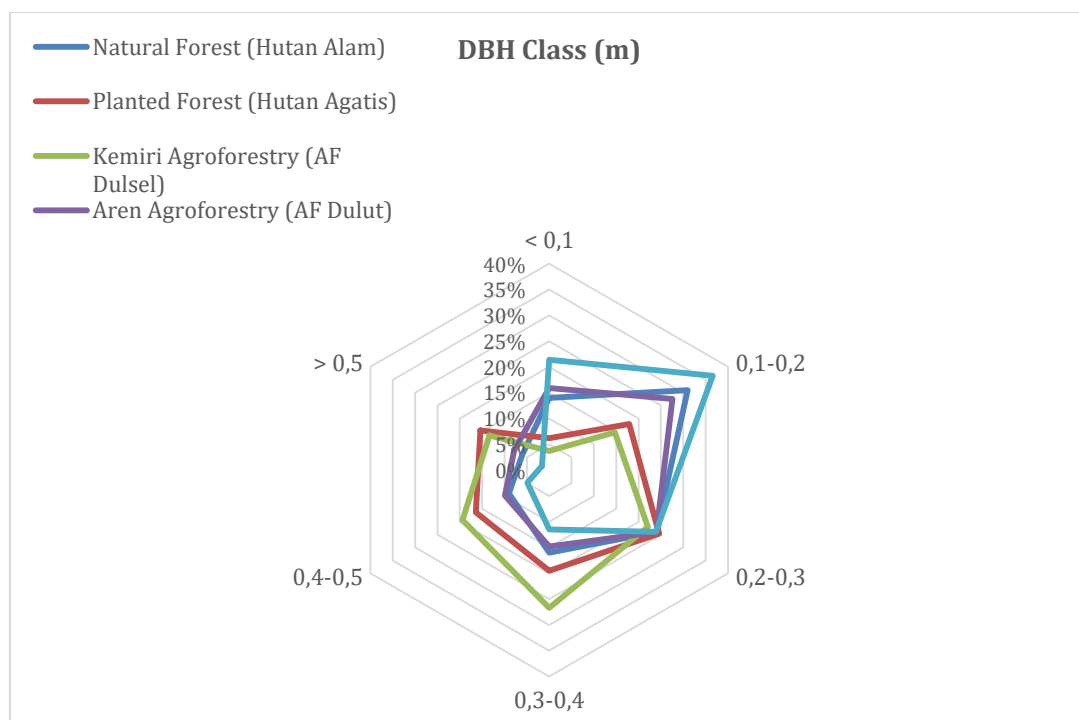
Tabel 1. Struktur Vegetasi dan Indeks Keanekaragaman pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan di Sulawesi, Indonesia

Sistem penggunaan lahan	Kepadatan pohon (pohon/ha)	Tinggi rata-rata (m)	Luas bidang dasar (m ² /ha)	Keanekaragaman Shannon (H')	Keanekaragaman Simpson (1-D)	Kemerataan Pielou (J)
Hutan alami	$198 \pm 12,7$	$13,34 \pm 1,21$	$20,4 \pm 1,32$	$3,12 \pm 0,15$	$0,92 \pm 0,03$	$0,84 \pm 0,04$
Hutan tanaman	$215 \pm 13,8$	$9,87 \pm 0,95$	$18,6 \pm 1,17$	$2,54 \pm 0,12$	$0,85 \pm 0,04$	$0,76 \pm 0,03$
Agroforestri kemiri	$252 \pm 16,1$	$7,24 \pm 0,78$	$21,8 \pm 1,52$	$2,41 \pm 0,11$	$0,83 \pm 0,03$	$0,73 \pm 0,04$
Agroforestri aren	$246 \pm 15,8$	$7,63 \pm 0,82$	$20,9 \pm 1,41$	$2,36 \pm 0,10$	$0,82 \pm 0,03$	$0,72 \pm 0,03$
Agroforestri durian	$245 \pm 15,6$	$7,82 \pm 0,85$	$20,8 \pm 1,39$	$2,38 \pm 0,11$	$0,82 \pm 0,03$	$0,71 \pm 0,04$

Catatan: Nilai disajikan sebagai rerata $\pm$ galat baku ($n = 6$ lokasi per sistem penggunaan lahan). Sistem penggunaan lahan yang berbeda dengan huruf superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang signifikan (Tukey HSD, $p < 0,05$).

Analisis sebaran kelas diameter menunjukkan pola yang berbeda antarsistem penggunaan lahan (Gambar 3). Hutan alami menunjukkan distribusi berbentuk J terbalik, yang merupakan ciri ekosistem tidak terganggu dengan regenerasi berkelanjutan. Hutan tanaman menunjukkan distribusi yang lebih seragam antarkelas diameter, yang mencerminkan sifat pengelolaan dengan pemanenan periodik. Sistem agroforestri menunjukkan pola antara, dengan proporsi

pohon berdiameter kecil dan sedang yang lebih tinggi dibandingkan hutan alami, namun representasi pohon berdiameter besar yang lebih baik dibandingkan perkebunan monokultur. Kompleksitas struktural pada sistem agroforestri ini konsisten dengan temuan pada lanskap agroforestri di Indonesia, yang mengindikasikan bahwa praktik pengelolaan tradisional mempertahankan unsur struktural yang mendukung fungsi ekologis.



Gambar 3. Sebaran kelas diameter pada lima sistem penggunaan lahan di Sulawesi

b. Pola Keanekaragaman dan Komposisi Spesies

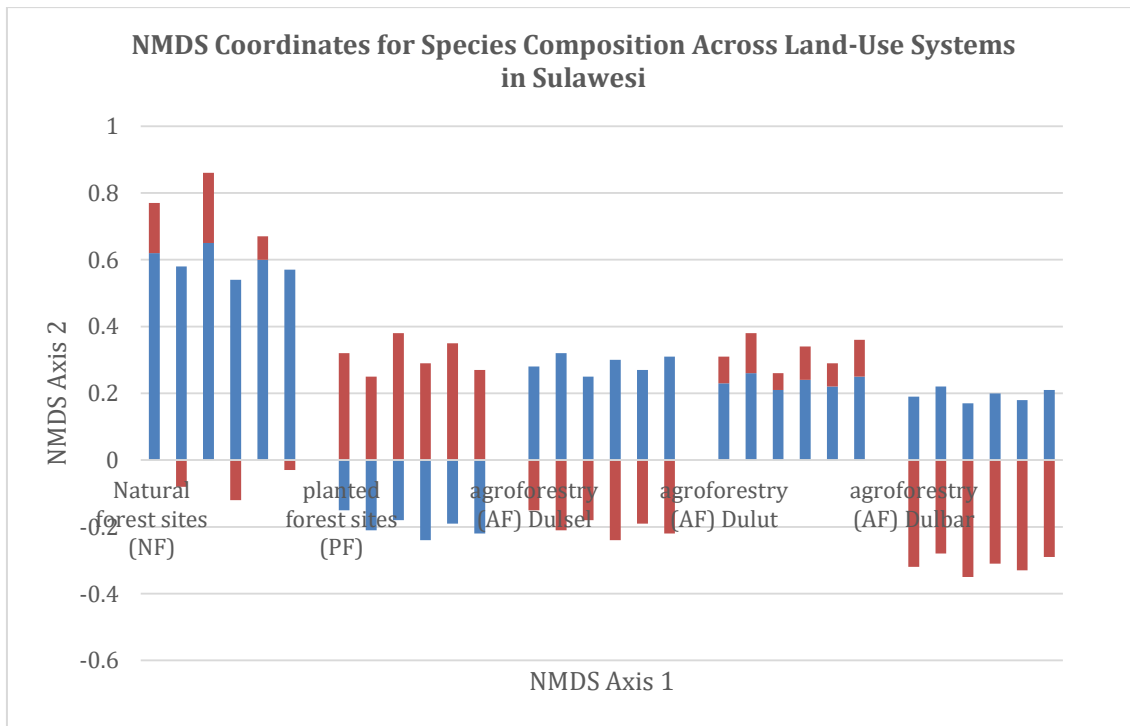
Gradien keanekaragaman yang jelas teramati di antara sistem penggunaan lahan, yakni hutan alami menunjukkan kekayaan spesies tertinggi ($45 \pm 2,1$ spesies) dan indeks Shannon ($H' = 3,12 \pm 0,15$), diikuti oleh hutan tanaman ($30 \pm 1,8$ spesies; $H' = 2,54 \pm 0,12$), sedangkan sistem agroforestri menunjukkan keanekaragaman sedang ($21,7 \pm 1,2$ spesies; $H' = 2,38 \pm 0,11$) (Tabel 1). Namun demikian, tiga sistem agroforestri menunjukkan metrik keanekaragaman yang

sangat mirip meskipun fokus ekonominya berbeda, sehingga mengindikasikan bahwa struktur dasar agroforestri menciptakan kondisi ekologis yang relatif sebanding terlepas dari spesies tanaman komoditas yang dominan.

Analisis NMDS terhadap komposisi spesies menunjukkan diferensiasi yang signifikan antarsistem penggunaan lahan (Gambar 4; PERMANOVA, $F = 12,34$, $p < 0,001$). Hutan alami dicirikan oleh proporsi tinggi spesies endemik seperti *Agathis robusta*, *Molonggoile* spp., dan *Biamenga* spp., sedangkan sistem agroforestri

didominasi oleh spesies bernilai ekonomi seperti *Aleurites moluccanus* (kemiri), *Arenga pinnata* (aren), dan *Durio zibethinus* (durian). Hutan tanaman menunjukkan komposisi antara, dengan campuran spesies kayu lokal dan introduksi. Dengan demikian, perbedaan komposisi yang tajam antara

sistem alami dan sistem terkelola menunjukkan adanya pemisahan ekologis yang kuat, sementara dominasi spesies ekonomi pada agroforestri mencerminkan konteks budaya dan ekologi Sulawesi yang khas.



Gambar 4. Ordinasi NMDS komposisi spesies pada berbagai sistem penggunaan lahan.

c. Nilai Ekonomi dan Status Konservasi Spesies Pohon

Valuasi ekonomi menunjukkan perbedaan yang substansial pada nilai pasar spesies pohon antarsistem penggunaan lahan (Tabel 2). Sistem agroforestri menunjukkan nilai ekonomi per hektare yang secara signifikan lebih tinggi (USD 1.842 ± 98) dibandingkan hutan alami (USD 327 ± 25) dan hutan tanaman (USD 895 ± 63) ($p < 0,01$). Keunggulan ekonomi ini terutama berasal dari pencantuman yang disengaja atas pohon buah dan kacang bernilai tinggi pada sistem agroforestri; sistem berbasis kemiri menghasilkan nilai tertinggi (USD 2.115 ± 112/ha) karena pemanfaatan ganda kacang kemiri untuk pasar kuliner dan

kosmetik. Dengan demikian, kinerja ekonomi yang kuat pada sistem agroforestri memperlihatkan kelayakan finansial diversifikasi dibandingkan sistem monokultur, meskipun pendorong ekonominya spesifik pada konteks pasar Sulawesi.

Tabel 2. Nilai Ekonomi dan Status Konservasi Spesies Pohon pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan di Sulawesi

Sistem penggunaan lahan	Nilai ekonomi (USD/ha)	Spesies endemik (%)	Spesies Daftar Merah IUCN (%)	Spesies dengan banyak kegunaan (%)
Hutan alami	327 ± 25	68,3	22,2	35,6

Hutan tanaman	895 ± 63	12,4	4,5	18,3
Agroforestri kemiri	2.115 ± 112	8,7	0,0	92,4
Agroforestri aren	1.785 ± 94	7,3	0,0	89,6
Agroforestri durian	1.627 ± 86	9,5	2,3	87,1

Catatan: Nilai disajikan sebagai rerata ± galat baku (n = 6 lokasi per sistem penggunaan lahan). Sistem penggunaan lahan yang berbeda dengan huruf superskrip berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang signifikan (Tukey HSD, p < 0,05).

Analisis utilitas spesies menunjukkan bahwa sistem agroforestri mengandung proporsi spesies pohon multifungsi yang secara signifikan lebih tinggi ($89,8 \pm 1,7\%$) dibandingkan hutan alami ($35,6 \pm 2,4\%$) dan hutan tanaman ($18,3 \pm 1,2\%$) ($p < 0,01$). Keragaman fungsional ini—di mana satu spesies dapat menyediakan banyak produk, misalnya aren yang menyediakan gula, serat, dan bahan konstruksi—merupakan keunggulan penting bagi penghidupan petani kecil.

d. Nilai Konservasi dan Status Spesies

Walaupun sistem agroforestri menunjukkan kinerja ekonomi yang kuat, nilai konservasi yang secara signifikan lebih tinggi tetap dipertahankan oleh hutan alami, dengan 68,3% spesies bersifat endemik Sulawesi dibandingkan sekitar 8,5% pada sistem agroforestri (Tabel 2). Selain itu, hutan alami mengandung 22,2% spesies yang tercantum pada Daftar Merah IUCN, sedangkan representasinya minimal pada sistem agroforestri (1,1%) dan hutan tanaman (4,5%). Namun demikian, analisis menunjukkan bahwa sistem agroforestri mempertahankan 51% dari total kumpulan spesies regional (92 spesies pada seluruh lokasi), termasuk beberapa spesies yang menjadi perhatian konservasi yang tidak tercatat pada lokasi hutan alami dalam wilayah studi.

Hubungan antara nilai ekonomi dan metrik keanekaragaman hayati menunjukkan pola yang kompleks (Tabel 3). Kekayaan spesies dan nilai ekonomi berkorelasi negatif antarsistem penggunaan lahan ($r = -0,87$, $p < 0,05$), sedangkan kepadatan pohon dan nilai ekonomi berkorelasi positif ($r = 0,79$, $p < 0,05$). Hal ini mengindikasikan bahwa intensifikasi pengelolaan untuk spesies ekonomi menurunkan keanekaragaman spesies secara keseluruhan, namun parameter struktural tertentu yang mendukung fungsi ekologis dapat dipertahankan atau bahkan ditingkatkan.

Tabel 3. Nilai Ekonomi dan Metrik Keanekaragaman Hayati pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan di Sulawesi

Sistem penggunaan lahan	Nilai ekonomi (USD/ha)	Kekayaan spesies	Kepadatan pohon (pohon/ha)
Hutan alami	327	45	198
Hutan tanaman	895	30	215
Agroforestri kemiri	2.115	21	252
Agroforestri aren	1.785	22	246
Agroforestri durian	1.627	23	245

Catatan: Data menunjukkan rerata dari enam lokasi replikasi per sistem penggunaan lahan. Nilai ekonomi dihitung berdasarkan harga pasar terkini untuk produk utama dan sekunder.

Kekayaan spesies merupakan jumlah total spesies pohon yang tercatat per sistem. Kepadatan pohon diukur sebagai batang per hektare dengan DBH ≥ 5 cm. Korelasi negatif yang kuat antara nilai ekonomi dan kekayaan spesies ($r = -0,87$, $p < 0,05$) menunjukkan bahwa pengembalian ekonomi yang lebih tinggi berkaitan dengan penurunan keragaman spesies; sebaliknya, korelasi positif antara nilai ekonomi dan kepadatan pohon ($r = 0,79$, $p < 0,05$) menunjukkan bahwa sistem yang intensif secara ekonomi mempertahankan kepadatan

pohon yang lebih tinggi meskipun kekayaan spesiesnya lebih rendah. Dengan demikian, trade-off dan sinergi antara produktivitas ekonomi dan konservasi keanekaragaman hayati pada sistem penggunaan lahan tropis ditunjukkan secara nyata.

e. Kontribusi Keanekaragaman Hayati Regional dan Konteks Lanskap

Analisis pemartisian keanekaragaman menunjukkan bahwa sistem agroforestri mempertahankan 46% keanekaragaman alfa (α) yang ditemukan pada hutan alami, namun memberikan kontribusi yang tidak proporsional terhadap keanekaragaman regional (γ) (Tabel 4). Komponen keragaman beta (β), yakni pergantian spesies antar-sistem, menyumbang 54% dari total keanekaragaman lanskap, yang menandakan perbedaan komposisi yang substansial antarjenis penggunaan lahan. Dengan demikian, pemeliharaan mosaik berbagai sistem penggunaan lahan dipandang krusial untuk konservasi keseluruhan kumpulan spesies regional.

Tabel 4. Pemartisian Keanekaragaman pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan di Sulawesi

Komponen keanekaragaman	Hutan alami	Hutan tanaman	Sistem agroforestri	Kontribusi terhadap total keanekaragaman lanskap (%)
Keanekaragaman alfa (rerata $\pm$ SE; H')	3,12 $\pm$ 0,15	2,54 $\pm$ 0,12	2,38 $\pm$ 0,11	46,2
Keanekaragaman beta (turnover)	–	0,58	0,74	53,8
Keanekaragaman gama	4,52	–	–	100,0
Spesies unik per sistem	28	15	19	–

Catatan: Keanekaragaman alfa dinyatakan sebagai indeks Shannon (H'). Keanekaragaman beta dihitung sebagai beta Whittaker.

Analisis pergantian spesies menunjukkan bahwa sistem agroforestri hanya berbagi 32% spesies dengan hutan alami, tetapi mengandung 19 spesies yang tidak tercatat pada lokasi hutan alami dalam wilayah studi. Efek komplementaritas ini menegaskan bahwa sistem agroforestri berpotensi berfungsi sebagai refugia konservasi bagi spesies tertentu yang tidak terwakili pada kawasan hutan lindung akibat kebutuhan habitat spesifik atau pola penggunaan lahan historis.

f. Konektivitas Struktural dan Fungsional

Analisis redundansi mengidentifikasi luas bidang dasar dan kepadatan pohon sebagai parameter struktur vegetasi yang paling kuat terkait dengan pola komposisi spesies antarsistem penggunaan lahan ($R^2 = 0,68$, $p < 0,001$). Secara khusus, hutan alami dicirikan oleh luas bidang dasar tinggi dengan kepadatan lebih rendah, sedangkan sistem agroforestri mempertahankan luas bidang dasar yang serupa melalui kepadatan lebih tinggi dari pohon berukuran lebih kecil. Mekanisme kompensasi struktural ini mengindikasikan bahwa sistem agroforestri dapat menyediakan kompleksitas habitat yang sebanding dengan hutan alami meskipun komposisi spesiesnya berbeda, sehingga fungsi ekologis seperti pengaturan mikroklimat dan konservasi tanah berpotensi tetap didukung. Analisis kelompok fungsional menunjukkan bahwa sistem agroforestri mempertahankan representasi bermakna dari kelompok fungsional kunci, termasuk spesies pengikat nitrogen ($12,3 \pm 1,1\%$) dan spesies yang penyebarannya dibantu satwa ($67,8 \pm 3,2\%$), meskipun proporsinya lebih rendah dibandingkan hutan alami (masing-masing $24,7 \pm 1,8\%$ dan $82,4 \pm 2,7\%$). Dengan demikian, keragaman fungsional kunci cenderung tetap terpelihara meskipun terjadi pergantian komposisi spesies, yang mengindikasikan tetap berlangsungnya proses ekologi penting pada lanskap terkelola.

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa: (1) sistem agroforestri petani kecil di

Sulawesi mempertahankan tingkat keanekaragaman pohon sedang hingga tinggi sekaligus memberikan manfaat ekonomi yang substansial, sehingga asumsi konvensional bahwa lanskap pertanian niscaya menurunkan keanekaragaman hayati ditantang. Kesebandingan luas bidang dasar antara sistem agroforestri (21,2 m²/ha) dan hutan alami (20,4 m²/ha), meskipun tinggi rata-rata pohon pada agroforestri lebih rendah (7,56 m vs. 13,34 m), mengindikasikan bahwa potensi penyimpanan karbon yang serupa dapat dicapai melalui mekanisme kompensasi struktural. Kompensasi struktural tersebut dicapai melalui kepadatan pohon yang lebih tinggi pada agroforestri (248 pohon/ha) dibandingkan hutan alami (198 pohon/ha), sehingga fungsi ekologis penting berpotensi dipertahankan meskipun terjadi pergantian spesies. Dengan demikian, wawasan penting bagi pengelolaan lanskap tropis disediakan karena menunjukkan bahwa sistem agroforestri dapat memenuhi fungsi ekologis tertentu meskipun tidak mempertahankan komposisi spesies yang sama dengan hutan alami. (2) Gradien keanekaragaman (hutan alami > hutan tanaman > agroforestri) sejalan dengan pola pada wilayah tropis lain, namun tingkat keanekaragaman yang relatif tinggi pada agroforestri Sulawesi ($H' = 2,38$) merupakan temuan penting mengingat konteks biogeografi Wallacea yang unik. Walaupun hanya 46% keanekaragaman alfa hutan alami yang dipertahankan oleh agroforestri, kontribusi terhadap keanekaragaman gama regional justru tidak proporsional, dengan 51% dari total kumpulan spesies regional (92 spesies) dipertahankan secara kolektif. Komponen keanekaragaman beta yang tinggi (54% dari total keanekaragaman lanskap) mengindikasikan bahwa mosaik berbagai penggunaan lahan penting untuk menjaga keseluruhan kumpulan spesies regional. Oleh karena itu, perencanaan konservasi di Sulawesi perlu diarahkan pada pendekatan lanskap terintegrasi, bukan semata mengandalkan kawasan lindung. (3)

Perbedaan tajam komposisi spesies antara hutan alami dan agroforestri—yang ditunjukkan oleh NMDS serta tumpang tindih spesies rendah (32%)—menunjukkan nilai konservasi yang saling melengkapi dari kedua sistem. Hutan alami mempertahankan proporsi lebih tinggi spesies endemik (68,3%) dan spesies Daftar Merah IUCN (22,2%), sedangkan agroforestri menampung 19 spesies yang tidak tercatat pada lokasi hutan alami dalam wilayah studi. Dengan demikian, agroforestri berpotensi berfungsi sebagai refugia bagi spesies tertentu pada lanskap yang dimodifikasi manusia. (4) Kinerja ekonomi agroforestri yang kuat (USD 1.842 ± 98/ha) dibandingkan hutan alami (USD 327 ± 25/ha) dan hutan tanaman (USD 895 ± 63/ha) memberikan peluang dan tantangan bagi perencanaan konservasi. Keunggulan ekonomi yang didorong pohon buah dan kacang bernilai tinggi mendukung keamanan penghidupan petani kecil sekaligus mempertahankan keanekaragaman hayati yang bermakna, sehingga kesenjangan antara dimensi ekologi dan ekonomi yang sering terpisah dalam penilaian sebelumnya dapat dijematani. Namun, korelasi negatif antara nilai ekonomi dan kekayaan spesies ($r = -0,87$) mengonfirmasi adanya trade-off antara intensifikasi ekonomi dan konservasi spesies. Sebaliknya, korelasi positif antara nilai ekonomi dan kepadatan pohon ($r = 0,79$) menunjukkan bahwa parameter struktural tertentu dapat dipertahankan atau ditingkatkan melalui pengelolaan ekonomi, sehingga sebagian fungsi ekologi tetap dapat didukung.

Retensi keragaman fungsional pada agroforestri—khususnya keberadaan spesies pengikat nitrogen (12,3%) dan spesies yang penyebarannya dibantu satwa (67,8%)—mengindikasikan bahwa proses ekosistem penting berpotensi tetap terpelihara meskipun komposisi spesies berubah. Walaupun proporsinya lebih rendah dibandingkan hutan alami, keberadaannya tetap menunjukkan bahwa integritas fungsional tertentu dapat dipertahankan,

sehingga evaluasi agroforestri tidak seharusnya hanya bertumpu pada jumlah spesies semata.

Konteks unik agroforestri tradisional Sulawesi—yang telah berevolusi lintas generasi dalam kondisi budaya dan ekologi tertentu—menegaskan pentingnya pendekatan konservasi dan pembangunan berkelanjutan yang berbasis tempat (*place-based*). Berbeda dengan banyak sistem agroforestri di wilayah lain yang baru dibangun sebagai intervensi konservasi, sistem di Sulawesi merupakan praktik budaya yang telah lama mengintegrasikan tujuan ekonomi dan ekologi secara organik. Integrasi pengetahuan tradisional dan penilaian ilmiah melalui pelibatan masyarakat, sebagaimana diterapkan dalam penelitian ini, dapat dipandang sebagai model menjanjikan untuk riset pada lanskap yang didominasi manusia, karena aspek etika terpenuhi dan kualitas data diperkuat.

SIMPULAN

Penelitian ini mengungkap perbedaan signifikan dalam keanekaragaman spesies, struktur vegetasi, dan nilai ekonomi antar sistem penggunaan lahan di Sulawesi. Hutan alami menunjukkan kekayaan spesies tertinggi (45 spesies; $H'=3,12$), sementara sistem agroforestri mempertahankan keanekaragaman sedang (21,7 spesies; $H'=2,38$) namun dengan kepadatan pohon lebih tinggi (248 pohon/ha) dan nilai ekonomi jauh lebih besar (USD 1.842/ha) dibanding hutan alami (USD 327/ha). Sistem agroforestri berkontribusi signifikan terhadap konservasi keanekaragaman hayati regional dengan menampung 51% dari total kumpulan spesies regional (92 spesies), termasuk 19 spesies unik yang tidak ditemukan di hutan alami. Temuan korelasi negatif antara kekayaan spesies dan nilai ekonomi ($r=-0,87$) berdampingan dengan korelasi positif antara kepadatan pohon dan nilai ekonomi ($r=0,79$), mengindikasikan mekanisme kompensasi struktural pada agroforestri yang mempertahankan luas bidang dasar melalui kepadatan lebih tinggi

dari pohon berukuran lebih kecil. Dengan demikian, sistem agroforestri tradisional di Sulawesi menunjukkan potensi strategis sebagai matriks konservasi yang efektif, mampu menyeimbangkan kebutuhan ekonomi masyarakat lokal dengan upaya konservasi keanekaragaman hayati di hotspot Wallacea.

ACKNOWLEDGMENTS

Kami mengucapkan terima kasih kepada masyarakat Dulamayo atas dukungan data dan akses lokasi yang sangat berharga. Apresiasi khusus untuk tim lapangan dan petani yang berpartisipasi. Terima kasih kepada Dinas Kehutanan dan Lingkungan Hidup Provinsi Gorontalo atas izin penelitian dan para pihak yang sangat berarti bagi keberhasilan studi.

DAFTAR PUSTAKA

- Akdah, R. D. (2024). Species composition, stand structure, and carbon stock in the agroforestry system of Wana Lestari Community Forestry, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Biodiversitas*, 25(9), 3350-3358. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d250957>
- Aso, O. P., Mustari, A. H., & Prasetyo, L. B. (2025). Spatial distribution model of anoa, *Bubalus spp.*, in Tanjung Peropa Wildlife Reserve. *Biodiversity Data Journal*, 13. <https://doi.org/10.3897/BDJ.13.e153431>
- Barakagira, A., & Ndungo, I. (2023). Watershed management and climate change adaptation mechanisms used by people living in dryland areas of Lokere catchment in Karamoja, Uganda. *Environmental and Socio-Economic Studies*, 11(1). <https://doi.org/10.2478/enviro-n-2023-0004>
- Bardsley, D. K., Cedamon, E., Paudel, N. S., & Nuberg, I. (2022). Education and sustainable forest management in the mid-hills of Nepal. *Journal of Environmental Management*,

319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvma.n.2022.115698>
- Bradfer-Lawrence, T., Bunnefeld, N., Gardner, N., Willis, S. G., & Dent, D. H. (2020). Rapid assessment of avian species richness and abundance using acoustic indices. *Ecological Indicators*, 115, 106400. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2020.106400>
- De-Sousa, K. T. (2023). Effects of tree arrangements of silvopasture system on behaviour and performance of cattle - A systematic review. *Annals of Animal Science*, 23(3), 629-639. <https://doi.org/10.2478/aoas-2023-0002>
- Dröge, S. (2021). Listening to a changing landscape: Acoustic indices reflect bird species richness and plot-scale vegetation structure across different land-use types in north-eastern Madagascar. *Ecological Indicators*, 120, 106929. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2020.106929>
- Eyasu, G., Tolera, M., & Negash, M. (2020). Woody species composition, structure, and diversity of homegarden agroforestry systems in southern Tigray, Northern Ethiopia. *Heliyon*, 6(12), e05500. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05500>
- Geburu, B. M., Wang, S. W., Kim, S. J., & Lee, W. K. (2019). Socio-ecological niche and factors affecting agroforestry practice adoption in different agroecologies of southern Tigray, Ethiopia. *Sustainability*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/su11133729>
- Hailu, L. (2021). Effect of land-use practices on species diversity and selected soil property in Somodo Watershed South-Western Ethiopia. *PLOS ONE*, 16(5), e0252305. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252305>
- Hartoyo, A. P. P. (2024). Tree species diversity and management in agroforestry Pohpohan (*Pilea melastomoides*): The case in the traditional zone of Gunung Halimun Salak National Park, Indonesia. *Biotropia*, 31(3), 380-390. <https://doi.org/10.11598/btb.2024.31.3.2281>
- Jupri, A. (2021). Community-based spring conservation in Catchment area of Kemalik Lingsar, Lombok, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 712(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/712/1/012051>
- Lacerda, A. E. B. (2023). Sustainability of Shade-Grown Erva-Mate Production: A Management Framework for Forest Conservation. *Conservation*, 3(3), 394-410. <https://doi.org/10.3390/conservation3030027>
- Maldonado, A. D., Valdivielso, A., Rescia, A., & Aguilera, P. A. (2020). Probabilistic graphical models for species richness prediction: Are current protected areas effective to face climate emergency? *Global Ecology and Conservation*, 23, e01162. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01162>
- Maney, C., Sassen, M., & Hill, S. L. L. (2022). Modelling biodiversity responses to land use in areas of cocoa cultivation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107712>
- Næsset, E. (2020). Erratum: Use of local and global maps of forest canopy height and aboveground biomass to enhance local estimates of biomass in miombo woodlands in Tanzania (*International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* (2020) 89, (S0303243419312103),

- (10.1016/j.jag.2020.102109)).
International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 93. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102138>
- Quandt, A. (2020). Contribution of agroforestry trees for climate change adaptation: narratives from smallholder farmers in Isiolo, Kenya. *Agroforestry Systems*, 94(6), 2125-2136. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00535-0>
- Rajaonarimalala, R., Korol, Y., Andrianarimisa, A., Dröge, S., Fulgence, T. R., Grass, I., Kreft, H., Osen, K., Rakotomalala, A. A. N. A., Rakouth, B., Ranarijaona, H. L. T., Randriamanantena, R., Ratsoavina, F. M., Raveloson Ravaomanarivo, L. H., Raveloaritiana, E., Schwab, D., Soazafy, M. R., Tschardtke, T., Wurz, A., ... Martin, D. A. (2024). Complex stands in forested tropical landscapes harbor more endemic biodiversity and ecosystem functions. *Global Ecology and Conservation*, 54, e03154. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03154>
- Rahman, S. A., Baral, H., Sharma, R., Samsudin, Y. B., Meyer, M., Lo, M., Artati, Y., Simamora, T. I., Andini, S., & Leksono, B. (2019). Integrating bioenergy and food production on degraded landscapes in Indonesia for improved socioeconomic and environmental outcomes. *Food and Energy Security*, 8(3). <https://doi.org/10.1002/fes3.165>
- Recanati, F., Arrigoni, A., Scaccabarozi, G., Marveggio, D., Melià, P., & Dotelli, G. (2018). LCA Towards Sustainable Agriculture: The Case Study of Cupuaçu Jam from Agroforestry. *Procedia CIRP*, 69, 557-561. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.003>
- Rendón-Sandoval, F. J., Casas, A., Moreno-Calles, A. I., Torres-García, I., & García-Frapolli, E. (2020). Traditional Agroforestry Systems and Conservation of Native Plant Diversity of Seasonally Dry Tropical Forests. *Sustainability*, 12(11), 4600. <https://doi.org/10.3390/su12114600>
- Rigo, F., Panizza, C., Anderle, M., Chianucci, F., Obojes, N., Tappeiner, U., Hilpold, A., & Mina, M. (2024). Relating forest structural characteristics to bat and bird diversity in the Italian Alps. *Forest Ecology and Management*, 554. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121673>
- Rowe, R. L., Prayogo, C., Oakley, S., Hairiah, K., van Noordwijk, M., Wicaksono, K. P., Kurniawan, S., Fitch, A., Cahyono, E. D., Suprayogo, D., & McNamara, N. P. (2022). Improved Coffee Management by Farmers in State Forest Plantations in Indonesia: An Experimental Platform. *Land*, 11(5), 671. <https://doi.org/10.3390/land11050671>
- Tasnim, N., Hossain, M. R., Fayeem, H. A. M., Mostofa, Z. bin, Anika, T. T., Mou, M., Modabber, A., Zaddary, A. M., Gupta, A. das, Marma, M., Imran, M. I. H., Khan, M. M. H., Datta, A., Khatun, R., Ahmed, S., & Sarker, S. K. (2024). Towards data-driven tropical forest restoration: Uncovering spatial variation, interactions and historical management effects on nutrients along soil depth gradients. *Science of the Total Environment*, 954. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176756>
- Tsani, M. K. (2024). Impact of Agroforestry Practices on Vegetation Diversity and Structure in Pesawaran,

- Indonesia. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 19(3), 937-946. <https://doi.org/10.18280/ij dne.190323>
- Vaca, R. A., Rodiles-Hernández, R., Soria-Barreto, M., Muñoz-Alonso, L. A., González-Díaz, A. A., & Castillo-Santiago, M. A. (2020). Applicability of biodiversity databases to regional conservation planning in the tropics: A case study evaluation of the effect of environmental bias on the performance of predictive models of species richness. *Acta Oecologica*, 109, 103653. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103653>
- Vineeta, Shukla, G., & Chakravarty, S. (2025). Traditional agroforestry systems to complement natural forest diversity. In *Forests for Inclusive and Sustainable Economic Growth* (pp. 251-268). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31406-3.00019-9>
- Vizinho, A., Avelar, D., Fonseca, A. L., Carvalho, S., Sucena-Paiva, L., Pinho, P., Nunes, A., Branquinho, C., Vasconcelos, A. C., Santos, F. D., Roxo, M. J., & Penha-Lopes, G. (2021). Framing the application of Adaptation Pathways for agroforestry in Mediterranean drylands. *Land Use Policy*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.landusopol.2021.105348>