

Multidimensional Sustainability Assessment of Cocoa Plantation Systems in Dryland Agroecosystems: A RAP-Cocoa Approach in Malaka Regency, Indonesia

Ahmad Mahfudz^{1*}, Maria Yestiana M. K. Leo²

¹⁻² Budidaya Tanaman Perkebunan, Fakultas Vokasi Logistik Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Corresponding Email: ahmadmahfudz210606@gmail.com

ABSTRAK

Keberlanjutan sistem perkebunan kakao menjadi isu strategis di tengah tekanan perubahan iklim, degradasi lingkungan, dan keterbatasan kapasitas sumber daya manusia, terutama pada agroekosistem lahan kering. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi status keberlanjutan perkebunan kakao di PT Timor Mitra Niaga, Kabupaten Malaka, Nusa Tenggara Timur, menggunakan pendekatan *Multidimensional Scaling* (MDS) melalui kerangka RAP-Kakao. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan data primer yang diperoleh melalui observasi dan wawancara semi-terstruktur terhadap 25 responden, serta menilai 13 atribut pada dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial. Hasil menunjukkan indeks keberlanjutan total sebesar 63,47 dan termasuk kategori cukup berkelanjutan. Dimensi ekonomi memiliki indeks tertinggi (71,25), diikuti sosial (61,38) dan lingkungan (57,79). Analisis leverage mengidentifikasi intensitas penggunaan pestisida, pengelolaan limbah kebun, dan pelatihan tenaga kerja sebagai atribut paling sensitif. Model MDS menunjukkan kinerja baik dengan *stress* 0,14 dan R^2 0,93. Temuan menegaskan perlunya penguatan pengelolaan lingkungan dan kapasitas tenaga kerja untuk meningkatkan keberlanjutan perkebunan kakao di lahan kering.

Kata kunci: kakao; keberlanjutan; *Multidimensional Scaling*; RAP-Kakao; lahan kering; Malaka.

ABSTRACT

The sustainability of cocoa plantation systems has become a strategic concern amid increasing pressures from climate change, environmental degradation, and limited human-resource capacity, particularly in dryland agroecosystems. This study aimed to evaluate the sustainability status of the cocoa plantation system at PT Timor Mitra Niaga, Malaka Regency, East Nusa Tenggara, using a *Multidimensional Scaling* (MDS) approach within the RAP-Cocoa framework. A descriptive quantitative design was employed, with primary data collected through field observations and semi-structured interviews involving 25 respondents. Sustainability was assessed across three dimensions—environmental, economic, and social—using 13 attributes. The results indicated an overall sustainability index of 63.47, classified as moderately sustainable. The economic dimension recorded the highest index (71.25), followed by the social (61.38) and environmental (57.79) dimensions. Leverage analysis identified pesticide-use intensity, plantation-waste management, and worker training as the most sensitive attributes affecting sustainability. The MDS model demonstrated good performance, with a stress value of 0.14 and an R^2 of 0.93. These findings highlight the need to strengthen environmental management and human-resource capacity to improve the sustainability of cocoa plantations in dryland agroecosystems.

Keywords: cocoa; sustainability; *Multidimensional Scaling*; RAP-Cocoa; dryland agroecosystem; Malaka.

PENDAHULUAN

Kakao (*Theobroma cacao* L.) merupakan salah satu komoditas perkebunan tropis yang memiliki peran strategis dalam rantai pasok industri pangan global, khususnya sebagai bahan baku utama industri cokelat dunia. Permintaan kakao global terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan industri makanan dan minuman berbasis cokelat. Berdasarkan data *International Cocoa Organization* (2024), produksi kakao dunia pada musim 2023/2024 mencapai sekitar 4,45 juta ton, meskipun mengalami penurunan sebesar 10,9% dibandingkan musim sebelumnya akibat perubahan iklim, serangan hama dan penyakit, serta penuaan tanaman produktif. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem produksi kakao global sedang menghadapi tantangan serius terkait keberlanjutan, baik dari aspek lingkungan, ekonomi, maupun sosial. Menurut Bunn, C. dkk. (2021), perubahan iklim telah menjadi faktor utama yang memengaruhi produktivitas kakao global dan meningkatkan kerentanan sistem produksi di wilayah tropis. Selain persoalan produktivitas, sistem budidaya kakao konvensional yang masih banyak bergantung pada pola monokultur telah dilaporkan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti degradasi tanah, penurunan biodiversitas, serta meningkatnya

ketergantungan terhadap input kimia berupa pupuk sintetis dan pestisida. Penelitian Clough dkk. (2016), Schroth dkk. (2016), serta Issaka, R. N. dkk. (2021) menunjukkan bahwa intensifikasi budidaya kakao tanpa mempertimbangkan prinsip keberlanjutan dapat menurunkan ketahanan ekosistem, meningkatkan risiko pencemaran lingkungan, dan mengancam produktivitas jangka panjang. Oleh karena itu, evaluasi keberlanjutan sistem perkebunan kakao menjadi sangat penting untuk memastikan keseimbangan antara produktivitas, konservasi lingkungan, dan kesejahteraan sosial.

Indonesia merupakan salah satu negara produsen kakao utama di dunia yang memiliki kontribusi penting terhadap perekonomian nasional, khususnya di sektor perkebunan rakyat. Luas areal kakao nasional tercatat lebih dari 1,5 juta hektar dengan total produksi berkisar antara 650.000–720.000 ton per tahun. Namun demikian, produktivitas kakao nasional masih tergolong rendah, yaitu sekitar 0,5–0,7 ton per hektar per tahun, jauh di bawah potensi optimal yang dapat mencapai 2–3 ton per hektar per tahun apabila dikelola secara baik. Menurut Direktorat Jenderal Perkebunan (2023), rendahnya produktivitas tersebut dipengaruhi oleh umur tanaman yang sudah tua, penerapan teknik budidaya yang belum optimal, serangan hama dan penyakit, serta rendahnya penerapan prinsip pertanian berkelanjutan. Hal ini menunjukkan bahwa permasalahan kakao di Indonesia tidak hanya terbatas pada produktivitas, tetapi juga menyangkut aspek keberlanjutan sistem produksi secara menyeluruh. Hal ini diperkuat oleh penelitian Gockowski, J. dkk. (2020) yang menyatakan bahwa efisiensi ekonomi perkebunan kakao sangat erat kaitannya dengan stabilitas ekologis dan kualitas pengelolaan kebun.

Kabupaten Malaka, Provinsi Nusa Tenggara Timur, merupakan salah satu wilayah pengembangan kakao di kawasan Indonesia Timur yang memiliki potensi agroekosistem cukup baik. Namun demikian, budidaya kakao di wilayah ini dilakukan pada kondisi agroekosistem lahan kering yang ditandai dengan curah hujan terbatas, tingkat evapotranspirasi tinggi, dan kandungan bahan organik tanah yang relatif rendah. Kondisi ini menciptakan tantangan tersendiri dalam pengelolaan sistem perkebunan kakao dibandingkan dengan wilayah sentra produksi utama seperti Sulawesi dan Sumatra. Menurut Djalante, R. dan Thomalla (2022), sistem pertanian pada ekosistem lahan kering di Asia Tenggara menghadapi tantangan besar dalam menjaga efisiensi produksi sekaligus keberlanjutan ekologis. Berdasarkan hasil observasi awal selama kegiatan praktik kerja lapangan di PT Timor Mitra Niaga, ditemukan beberapa permasalahan utama, seperti tingginya penggunaan pestisida, keterbatasan pelatihan tenaga kerja, serta pengelolaan lingkungan kebun yang belum optimal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa implementasi prinsip keberlanjutan di tingkat lapangan masih belum berjalan secara maksimal.

Berbagai penelitian terkait kakao telah banyak dilakukan, namun sebagian besar masih berfokus pada aspek tunggal seperti peningkatan produktivitas, pengendalian hama, atau analisis ekonomi secara parsial tanpa mengintegrasikan aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial secara simultan. Selain itu, penelitian keberlanjutan kakao di Indonesia masih didominasi pada wilayah sentra utama seperti Sulawesi, sementara wilayah Indonesia Timur seperti Nusa Tenggara Timur masih relatif kurang mendapatkan perhatian dalam literatur ilmiah. Penelitian Afoakwa dkk. (2019) menegaskan bahwa penilaian keberlanjutan yang bersifat spesifik wilayah sangat diperlukan karena sistem produksi kakao sangat dipengaruhi oleh kondisi agroekologi dan sosial-ekonomi setempat. Hal ini diperkuat oleh penelitian Rahmah, N. dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa integrasi dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial secara simultan mampu memberikan gambaran keberlanjutan yang lebih komprehensif. Selain kesenjangan wilayah penelitian, keterbatasan metodologis juga masih menjadi permasalahan dalam kajian keberlanjutan kakao. Penggunaan pendekatan multidimensi yang mampu menghasilkan indeks keberlanjutan kuantitatif masih relatif terbatas, khususnya pada sistem perkebunan berbasis perusahaan. Salah satu metode yang dinilai efektif dalam mengevaluasi keberlanjutan adalah *Multidimensional Scaling* (MDS) melalui pendekatan *Rapid Appraisal*

yang dikembangkan oleh Pitcher dan Kavanagh (2004). Pendekatan ini kemudian diadaptasi dalam berbagai sektor pertanian, termasuk RAP-Kakao, untuk mengukur status keberlanjutan berdasarkan indikator multidimensi. Metode MDS memungkinkan status keberlanjutan direpresentasikan dalam bentuk indeks numerik (0–100), sehingga lebih objektif, terukur, dan mudah diinterpretasikan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menilai status keberlanjutan sistem perkebunan kakao di PT Timor Mitra Niaga, Kabupaten Malaka. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan *Multidimensional Scaling* (MDS) berbasis RAP-Kakao untuk mengevaluasi keberlanjutan sistem perkebunan kakao pada agroekosistem lahan kering di wilayah Indonesia Timur. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih banyak berfokus pada wilayah sentra kakao utama seperti Sulawesi dan Sumatera serta hanya menitikberatkan pada aspek produktivitas atau ekonomi, penelitian ini mengintegrasikan dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial secara simultan dalam konteks perkebunan berbasis perusahaan. Pendekatan ini memberikan perspektif baru dalam memahami faktor-faktor sensitif yang memengaruhi keberlanjutan sistem perkebunan kakao secara lebih komprehensif dan kontekstual. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan kajian keberlanjutan perkebunan kakao serta menjadi dasar rekomendasi praktis bagi pengelolaan perkebunan kakao yang lebih berkelanjutan di masa mendatang.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan tujuan untuk menilai tingkat keberlanjutan sistem perkebunan kakao secara multidimensi pada agroekosistem lahan kering di Kabupaten Malaka, Nusa Tenggara Timur, dengan studi kasus di PT. Timor Mitra Niaga. Pendekatan kuantitatif dipilih karena mampu menghasilkan pengukuran yang objektif, sistematis, dan terukur terhadap atribut keberlanjutan berdasarkan indikator lingkungan, ekonomi, dan sosial. Menurut Rahmah, N. dkk. (2024), pendekatan kuantitatif multidimensi menjadi salah satu metode yang efektif dalam mengevaluasi keberlanjutan sistem perkebunan karena mampu mengintegrasikan berbagai indikator ke dalam satu indeks komposit. Penelitian dilaksanakan selama kegiatan praktik kerja lapangan pada bulan Juni 2026 di area perkebunan kakao PT. Timor Mitra Niaga yang berlokasi di Kabupaten Malaka, Provinsi Nusa Tenggara Timur.

Populasi dalam penelitian ini meliputi seluruh tenaga kerja lapangan, mandor, serta pihak manajemen yang terlibat langsung dalam aktivitas budidaya dan pengelolaan perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga. Teknik pengambilan sampel dilakukan menggunakan purposive sampling, yaitu pemilihan responden berdasarkan kriteria tertentu yang relevan dengan tujuan penelitian. Kriteria tersebut meliputi: (1) terlibat langsung dalam kegiatan budidaya kakao, (2) memiliki pengalaman kerja minimal enam bulan, dan (3) memahami sistem pengelolaan perkebunan secara operasional. Menurut Resnik, D. B. (2020), teknik *purposive sampling* sangat sesuai digunakan pada penelitian berbasis evaluasi sistem karena memungkinkan pemilihan responden yang benar-benar memahami objek kajian secara mendalam. Berdasarkan pendekatan minimal responden dalam analisis *Multidimensional Scaling* (MDS), jumlah sampel yang digunakan sebanyak 25 responden, yang dianggap cukup untuk menghasilkan stabilitas indeks keberlanjutan berdasarkan prinsip Monte Carlo simulation dalam metode RAPFISH (Pitcher & Preikshot, 2001; Kavanagh & Pitcher, 2004). Hal ini diperkuat oleh penelitian Prasetyo, T. dkk. (2022) yang menunjukkan bahwa analisis MDS tetap mampu menghasilkan model yang valid dan stabil meskipun menggunakan jumlah sampel terbatas, selama atribut yang digunakan relevan dan representatif.

Instrumen penelitian yang digunakan terdiri atas lembar observasi lapangan dan pedoman wawancara semi-terstruktur yang disusun berdasarkan kerangka *Rapid Appraisal for Cocoa* (RAP-Kakao). Sebelum digunakan dalam penelitian, instrumen terlebih dahulu

dilakukan uji validitas isi (*content validity*) melalui metode *expert judgment* yang melibatkan tiga ahli di bidang budidaya tanaman perkebunan dan keberlanjutan pertanian. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap atribut yang digunakan telah sesuai dengan tujuan penelitian dan mampu merepresentasikan dimensi keberlanjutan yang dianalisis. Menurut Ofori-Boateng, K. dkk. (2024), validitas isi merupakan tahapan penting dalam penelitian keberlanjutan karena menentukan tingkat ketepatan indikator dalam merepresentasikan kondisi sistem produksi. Selain itu, dilakukan uji coba terbatas (*pilot test*) kepada beberapa responden di luar sampel utama untuk menguji tingkat kejelasan pertanyaan, konsistensi pemahaman, dan kelayakan instrumen sebelum digunakan pada pengumpulan data utama.

Dalam pelaksanaan penelitian, aspek etika penelitian juga diterapkan mengingat adanya keterlibatan manusia sebagai responden. Prinsip etika yang digunakan meliputi *informed consent*, yaitu pemberian informasi kepada responden mengenai tujuan penelitian sebelum wawancara dilakukan; kerahasiaan data responden; partisipasi sukarela tanpa adanya paksaan; serta prinsip *non-maleficence* yang memastikan bahwa kegiatan penelitian tidak memberikan dampak negatif terhadap responden maupun perusahaan. Penerapan etika penelitian ini mengacu pada standar penelitian sosial dan pertanian sebagaimana dijelaskan oleh Resnik, D. B. (2020). Selain itu, menurut Ofori-Boateng, K. dkk. (2024), penerapan etika penelitian pada sektor perkebunan menjadi faktor penting untuk menjaga integritas data sosial dan hubungan kelembagaan dengan perusahaan. Pengolahan dan analisis data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel yang dimodifikasi berdasarkan prosedur RAPFISH untuk mendukung proses ordinasi Multidimensional Scaling (MDS), analisis leverage, serta simulasi Monte Carlo. Penggunaan perangkat lunak ini bertujuan untuk mempermudah proses perhitungan indeks keberlanjutan, pengujian sensitivitas atribut, dan validasi kestabilan model secara sistematis. Menurut Prasetyo, T. dkk. (2022), penggunaan perangkat lunak spreadsheet berbasis RAPFISH masih relevan dan efektif dalam analisis keberlanjutan multidimensi karena fleksibel dan mudah diadaptasi pada berbagai komoditas pertanian.

Untuk menguji kestabilan dan validitas model, dilakukan analisis Monte Carlo simulation dengan tingkat kepercayaan 95% untuk mengetahui sensitivitas indeks terhadap kemungkinan kesalahan skor, kehilangan data, dan variasi input. Selain itu, validitas model MDS juga dievaluasi menggunakan nilai *stress* dan koefisien determinasi (R^2). Model dianggap memiliki tingkat akurasi yang baik apabila nilai *stress* $< 0,25$ dan nilai $R^2 > 0,80$. Kombinasi pendekatan ini memungkinkan penilaian keberlanjutan dilakukan secara lebih komprehensif, objektif, dan dapat diandalkan dalam menggambarkan kondisi aktual sistem perkebunan kakao di lokasi penelitian. Hal ini sejalan dengan penelitian Läderach, P. dkk. (2022) yang menegaskan bahwa validasi model keberlanjutan menjadi komponen penting dalam memastikan ketepatan rekomendasi pengelolaan perkebunan jangka panjang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Indeks Keberlanjutan Sistem Perkebunan Kakao

Analisis indeks keberlanjutan sistem perkebunan kakao pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan *Multidimensional Scaling* (MDS) melalui metode RAP-Kakao, yang merupakan modifikasi dari RAPFISH untuk menilai tingkat keberlanjutan suatu sistem secara multidimensi. Pendekatan ini digunakan karena mampu mengintegrasikan berbagai atribut dari beberapa dimensi keberlanjutan ke dalam satu nilai indeks yang bersifat kuantitatif, sehingga dapat memberikan gambaran kondisi aktual sistem perkebunan secara lebih komprehensif, objektif. Berdasarkan hasil pengolahan data terhadap 13 atribut keberlanjutan, diperoleh nilai indeks total sebesar 63,47, yang menunjukkan bahwa sistem perkebunan kakao di PT Timor Mitra Niaga masih berada pada fase transisi menuju sistem yang lebih berkelanjutan. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa secara umum sistem pengelolaan perkebunan telah mampu

menjaga keseimbangan antara produktivitas, efisiensi ekonomi, dan aspek sosial, meskipun masih terdapat beberapa kelemahan mendasar pada aspek lingkungan.

Penilaian keberlanjutan dalam penelitian ini difokuskan pada tiga dimensi utama, yaitu dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial. Ketiga dimensi tersebut dipilih karena merupakan pilar utama dalam konsep pembangunan pertanian berkelanjutan yang saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan. Dimensi lingkungan digunakan untuk mengukur sejauh mana aktivitas budidaya kakao mampu menjaga kualitas ekosistem dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Dimensi ekonomi digunakan untuk menilai efisiensi dan stabilitas sistem produksi dalam menghasilkan keuntungan yang layak. Sementara itu, dimensi sosial digunakan untuk mengevaluasi aspek kesejahteraan tenaga kerja, keselamatan kerja, dan kapasitas sumber daya manusia dalam sistem perkebunan. Analisis indeks keberlanjutan ini menjadi tahap awal yang sangat penting karena memberikan gambaran umum mengenai posisi sistem perkebunan kakao dalam konteks keberlanjutan. Selain itu, hasil analisis ini juga menjadi dasar untuk mengidentifikasi dimensi dan atribut yang masih memerlukan perbaikan, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam penyusunan strategi pengelolaan perkebunan kakao yang lebih berkelanjutan di masa mendatang.

2. Indeks Keberlanjutan Berdasarkan Dimensi

Hasil analisis *Multidimensional Scaling* (MDS) menunjukkan bahwa sistem perkebunan kakao di PT Timor Mitra Niaga berada pada kategori cukup berkelanjutan pada seluruh dimensi, dengan indeks berkisar antara 57,79–71,25 (Tabel 4.1). Dimensi ekonomi memperoleh nilai tertinggi sebesar 71,25, diikuti dimensi sosial sebesar 61,38, sedangkan dimensi lingkungan memiliki nilai terendah sebesar 57,79. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa keberlanjutan sistem belum seimbang, dengan aspek ekonomi relatif lebih kuat sementara aspek lingkungan masih menjadi titik lemah utama.

Tabel 4.1. Nilai Indeks Keberlanjutan Berdasarkan Dimensi

Dimensi	Nilai Indeks	Status
Lingkungan	57,79	Cukup berkelanjutan
Ekonomi	71,25	Cukup berkelanjutan
Sosial	61,38	Cukup berkelanjutan

Dimensi ekonomi menjadi komponen terkuat dengan indeks 71,25. Nilai ini menunjukkan bahwa stabilitas produksi, pengelolaan biaya, dan operasional perkebunan relatif mendukung keberlanjutan ekonomi. Namun, indeks tersebut belum mencapai kategori sangat berkelanjutan sehingga peningkatan efisiensi input dan produktivitas jangka panjang tetap diperlukan. Selain faktor internal, fluktuasi harga kakao juga menjadi faktor eksternal yang berpotensi memengaruhi stabilitas ekonomi perkebunan. Dimensi sosial memperoleh indeks 61,38, yang menunjukkan kondisi cukup berkelanjutan tetapi masih memerlukan penguatan kapasitas tenaga kerja. Hubungan kerja, pembagian tugas, dan sistem upah telah berjalan relatif baik, tetapi aspek pelatihan teknis, keselamatan kerja, dan keterlibatan pekerja masih menjadi ruang perbaikan. Temuan ini menunjukkan bahwa keberlanjutan sosial tidak cukup hanya ditopang oleh hubungan kerja yang baik, tetapi juga memerlukan peningkatan kompetensi dan kapasitas tenaga kerja. Sementara itu, dimensi lingkungan memiliki indeks terendah (57,79). Rendahnya nilai ini terutama berkaitan dengan intensitas penggunaan pestisida, penggunaan input kimia secara berulang, pengelolaan limbah kebun yang belum optimal, dan rendahnya diversifikasi vegetasi. Kondisi agroekosistem lahan kering Malaka dengan curah hujan terbatas, evapotranspirasi tinggi, dan bahan organik tanah yang relatif rendah semakin meningkatkan kerentanan ekologis perkebunan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Rahmah et al. yang menunjukkan bahwa pengelolaan pestisida dan limbah masih menjadi tantangan penting dalam keberlanjutan sistem kakao. Oleh karena itu, penguatan pengelolaan lingkungan melalui pengurangan input kimia, pemanfaatan bahan organik, pengelolaan limbah, dan diversifikasi vegetasi perlu menjadi prioritas.

Secara keseluruhan, hasil MDS menunjukkan bahwa dimensi ekonomi merupakan kekuatan utama, sedangkan dimensi lingkungan menjadi prioritas intervensi, dengan dimensi sosial berperan sebagai aspek pendukung yang perlu diperkuat melalui peningkatan kapasitas tenaga kerja. Dengan demikian, peningkatan keberlanjutan perkebunan kakao di PT Timor Mitra Niaga perlu diarahkan pada penguatan pengelolaan lingkungan dan sumber daya manusia tanpa mengurangi kinerja ekonomi yang telah relatif baik.

3. Indeks Keberlanjutan Total Sistem Perkebunan Kakao

Setelah dilakukan analisis pada masing-masing dimensi keberlanjutan, tahap selanjutnya adalah menentukan indeks keberlanjutan total sistem perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga. Indeks total ini diperoleh melalui integrasi seluruh atribut dari dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial menggunakan metode *Multidimensional Scaling* (MDS) berbasis RAP-Kakao. Nilai indeks total memberikan gambaran umum mengenai posisi keberlanjutan sistem perkebunan secara keseluruhan, sehingga dapat digunakan sebagai indikator utama dalam mengevaluasi efektivitas pengelolaan perkebunan kakao di lokasi penelitian.

Hasil ordinasi MDS menunjukkan bahwa nilai indeks keberlanjutan total sistem perkebunan kakao sebesar 63,47, yang termasuk dalam kategori cukup berkelanjutan berdasarkan klasifikasi RAP-Kakao. Nilai ini menunjukkan bahwa secara umum sistem perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga telah memiliki fondasi pengelolaan yang cukup baik dalam mendukung keberlanjutan jangka panjang, namun masih memerlukan berbagai perbaikan pada beberapa atribut utama agar dapat mencapai kategori sangat berkelanjutan.

Tabel 4.2 Indeks Keberlanjutan Total Sistem Perkebunan Kakao

Parameter	Nilai
Indeks Total	63,47
Status	Cukup Berkelanjutan

Nilai indeks total sebesar 63,47 mencerminkan bahwa sistem perkebunan kakao di lokasi penelitian masih berada pada tahap transisi menuju sistem yang lebih berkelanjutan. Kondisi ini menunjukkan bahwa praktik pengelolaan kebun yang telah diterapkan saat ini sudah cukup mampu menjaga keseimbangan antara produktivitas ekonomi, pengelolaan sosial tenaga kerja, dan pemeliharaan lingkungan, meskipun belum mencapai tingkat optimal. Secara lebih rinci, kontribusi terbesar terhadap nilai indeks total berasal dari dimensi ekonomi yang memiliki nilai tertinggi dibandingkan dimensi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem perkebunan di PT. Timor Mitra Niaga relatif mampu menjaga stabilitas hasil produksi, efisiensi biaya operasional, dan keberlangsungan aktivitas ekonomi kebun. Kondisi ini menjadi indikator bahwa aspek ekonomi masih menjadi kekuatan utama dalam sistem perkebunan kakao di lokasi penelitian. Di sisi lain, dimensi lingkungan menjadi faktor pembatas utama dalam peningkatan indeks keberlanjutan total karena memperoleh nilai terendah. Hal ini mengindikasikan bahwa masih terdapat beberapa permasalahan seperti tingginya intensitas penggunaan pestisida, pengelolaan limbah kebun yang belum optimal, serta rendahnya diversifikasi vegetasi dalam area perkebunan. Jika kondisi ini tidak diperbaiki, maka dalam jangka panjang dapat berdampak pada penurunan kualitas tanah, meningkatnya risiko pencemaran lingkungan, dan berkurangnya ketahanan agroekosistem. Sementara itu, dimensi sosial juga menunjukkan bahwa meskipun hubungan kerja dan sistem upah sudah berjalan cukup baik, masih terdapat keterbatasan dalam aspek pelatihan tenaga kerja dan penerapan keselamatan kerja. Kondisi ini dapat memengaruhi efektivitas operasional kebun dan kualitas sumber daya manusia dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, nilai indeks total ini menunjukkan bahwa sistem perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga masih memiliki peluang besar untuk ditingkatkan menuju kategori sangat berkelanjutan. Upaya perbaikan perlu difokuskan pada atribut-atribut sensitif

yang memiliki pengaruh besar terhadap perubahan indeks keberlanjutan, terutama pada dimensi lingkungan dan sosial. Dengan demikian, hasil indeks total ini tidak hanya memberikan gambaran status keberlanjutan saat ini, tetapi juga menjadi dasar strategis dalam merumuskan kebijakan pengelolaan perkebunan kakao yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan di wilayah agroekosistem lahan kering Kabupaten Malaka.

4. Analisis Leverage pada Setiap Dimensi

Setelah diperoleh nilai indeks keberlanjutan total dan indeks pada masing-masing dimensi, tahap berikutnya adalah melakukan analisis leverage untuk mengidentifikasi atribut-atribut yang paling sensitif terhadap perubahan nilai keberlanjutan. Analisis leverage merupakan salah satu tahapan penting dalam metode RAP-Kakao karena dapat menunjukkan atribut mana yang memiliki kontribusi paling besar terhadap peningkatan atau penurunan indeks keberlanjutan. Dengan demikian, hasil analisis ini dapat menjadi dasar dalam menentukan prioritas intervensi dan strategi perbaikan sistem perkebunan kakao. Nilai tertinggi pada atribut pelatihan tenaga kerja menunjukkan bahwa kualitas sumber daya manusia memiliki pengaruh besar terhadap keberlanjutan sosial. Sementara itu, tingginya RMS pada penggunaan pestisida menunjukkan bahwa faktor lingkungan menjadi titik kritis dalam sistem budidaya. Dalam penelitian ini, analisis leverage dilakukan dengan menghitung nilai *Root Mean Square* (RMS) pada masing-masing atribut. Semakin tinggi nilai RMS suatu atribut, maka semakin besar pengaruh atribut tersebut terhadap perubahan indeks keberlanjutan. Atribut dengan nilai leverage tertinggi dianggap sebagai faktor kunci yang paling menentukan status keberlanjutan pada setiap dimensi.

Hasil analisis leverage pada penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat beberapa atribut yang memiliki sensitivitas tinggi pada masing-masing dimensi keberlanjutan. Atribut-atribut sensitif tersebut disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Atribut Sensitif Berdasarkan Analisis Leverage

Dimensi	Atribut	RMS
Lingkungan	Intensitas penggunaan pestisida	4,52
Lingkungan	Pengelolaan limbah kebun	4,21
Ekonomi	Stabilitas hasil panen	3,89
Sosial	Pelatihan tenaga kerja	4,76
Sosial	Keselamatan kerja	4,11

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.3, dimensi lingkungan menunjukkan bahwa intensitas penggunaan pestisida merupakan atribut yang paling sensitif dengan nilai RMS sebesar 4,52. Nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan pestisida memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap status keberlanjutan lingkungan di perkebunan kakao. Tingginya ketergantungan terhadap pestisida kimia dapat meningkatkan risiko pencemaran tanah, penurunan kualitas air, serta mengganggu keseimbangan organisme non-target di sekitar area perkebunan. Selain itu, atribut pengelolaan limbah kebun juga memiliki nilai leverage yang tinggi (4,21), yang mengindikasikan bahwa pengelolaan limbah organik dan non-organik masih belum optimal dan berpotensi memengaruhi kualitas lingkungan secara keseluruhan.

Pada dimensi ekonomi, atribut stabilitas hasil panen menjadi faktor paling sensitif dengan nilai RMS sebesar 3,89. Hal ini menunjukkan bahwa keberlanjutan ekonomi perkebunan kakao sangat dipengaruhi oleh konsistensi produksi dari waktu ke waktu. Fluktuasi hasil panen yang tinggi dapat berdampak pada ketidakstabilan pendapatan, efisiensi biaya operasional, serta kemampuan perusahaan dalam mempertahankan sistem produksi yang berkelanjutan. Stabilitas hasil panen sendiri sangat berkaitan dengan kondisi tanaman, pengelolaan budidaya, serta faktor iklim yang memengaruhi produktivitas. Sementara itu, pada dimensi sosial, atribut pelatihan tenaga kerja memiliki nilai leverage tertinggi yaitu 4,76, yang menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas sumber daya manusia merupakan faktor paling penting dalam mendukung keberlanjutan sosial sistem perkebunan kakao. Kurangnya pelatihan dapat

menyebabkan rendahnya pemahaman pekerja terhadap teknik budidaya berkelanjutan, keselamatan kerja, serta efisiensi operasional di lapangan. Selain itu, atribut keselamatan kerja juga memiliki pengaruh yang cukup tinggi dengan nilai RMS sebesar 4,11, yang menunjukkan bahwa penerapan standar keselamatan kerja masih perlu ditingkatkan untuk mengurangi risiko kecelakaan kerja dan meningkatkan kesejahteraan tenaga kerja.

Secara keseluruhan, hasil analisis leverage menunjukkan bahwa atribut-atribut yang paling sensitif terhadap keberlanjutan sistem perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga didominasi oleh aspek lingkungan dan sosial. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sistem ekonomi perkebunan sudah relatif stabil, peningkatan kualitas pengelolaan lingkungan dan penguatan kapasitas tenaga kerja masih menjadi prioritas utama dalam upaya meningkatkan indeks keberlanjutan secara keseluruhan. Oleh karena itu, strategi perbaikan yang direkomendasikan meliputi pengurangan penggunaan pestisida kimia melalui pendekatan pengendalian hama terpadu, optimalisasi pengelolaan limbah kebun, peningkatan program pelatihan tenaga kerja, serta penguatan implementasi standar keselamatan kerja di tingkat lapangan. Temuan ini mempertegas bahwa peningkatan keberlanjutan sistem perkebunan kakao tidak hanya bergantung pada aspek produksi dan ekonomi, tetapi juga memerlukan penguatan aspek ekologis dan sosial secara seimbang agar sistem perkebunan dapat bertahan dalam jangka panjang.

5. Uji Stabilitas dengan Monte Carlo

Untuk memastikan tingkat kestabilan dan konsistensi hasil analisis *Multidimensional Scaling* (MDS), penelitian ini dilanjutkan dengan uji *Monte Carlo simulation*. Uji Monte Carlo merupakan salah satu prosedur validasi dalam metode RAP-Kakao yang bertujuan untuk mengukur sensitivitas hasil indeks keberlanjutan terhadap kemungkinan kesalahan dalam proses pemberian skor, kehilangan data (*missing values*), maupun variasi subjektivitas dalam penilaian atribut. Menurut Pitcher dan Preikshot (2001), simulasi Monte Carlo digunakan untuk menguji sejauh mana hasil ordinasi MDS tetap stabil ketika terjadi gangguan kecil pada data input.

Dalam penelitian ini, simulasi Monte Carlo dilakukan pada tingkat kepercayaan 95% dengan mengulang proses ordinasi secara acak terhadap seluruh atribut keberlanjutan yang telah dianalisis. Tujuan utama dari simulasi ini adalah untuk membandingkan hasil indeks keberlanjutan utama dari analisis MDS dengan hasil simulasi Monte Carlo. Apabila selisih antara kedua hasil tersebut relatif kecil, maka model dapat dinyatakan stabil dan memiliki tingkat keandalan yang baik. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai indeks keberlanjutan total berdasarkan simulasi Monte Carlo adalah sebesar 64,02, sedangkan hasil ordinasi utama MDS menunjukkan nilai 63,47. Dengan demikian, selisih antara kedua hasil tersebut hanya sebesar 0,55, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Perbandingan Nilai Indeks MDS dan Monte Carlo

Analisis	Nilai
MDS	63,47
Monte Carlo	64,02
Selisih	0,55

Selisih yang sangat kecil antara hasil MDS dan Monte Carlo menunjukkan bahwa model yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tingkat kestabilan yang tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil indeks keberlanjutan tidak mengalami perubahan yang signifikan meskipun terdapat kemungkinan kesalahan dalam proses scoring atau variasi input data. Dengan kata lain, hasil analisis yang diperoleh dapat dianggap cukup konsisten dan dapat dipercaya dalam merepresentasikan kondisi aktual sistem perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga. Secara metodologis, kestabilan model yang tinggi menunjukkan bahwa pendekatan RAP-Kakao berbasis MDS yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tingkat robustness

yang baik untuk mengevaluasi keberlanjutan sistem perkebunan kakao pada agroekosistem lahan kering. Kondisi ini memperkuat validitas hasil penelitian serta menunjukkan bahwa atribut-atribut yang digunakan dalam penilaian sudah cukup representatif dalam menggambarkan kondisi keberlanjutan di lapangan.

Dengan demikian, hasil uji Monte Carlo dalam penelitian ini mempertegas bahwa nilai indeks keberlanjutan total sebesar 63,47 dapat dijadikan dasar yang kuat dalam merumuskan strategi perbaikan sistem perkebunan kakao, khususnya pada atribut-atribut yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan indeks keberlanjutan.

6. Validitas Model MDS

Validitas model dalam analisis *Multidimensional Scaling* (MDS) merupakan tahap penting untuk memastikan bahwa hasil ordinasi yang diperoleh memiliki tingkat akurasi dan reliabilitas yang baik dalam merepresentasikan kondisi keberlanjutan sistem perkebunan kakao di lokasi penelitian. Dalam pendekatan RAP-Kakao, pengujian validitas model dilakukan menggunakan dua parameter utama, yaitu nilai *stress* dan koefisien determinasi (R^2). Kedua parameter ini digunakan untuk mengukur sejauh mana model MDS mampu memetakan hubungan antar atribut keberlanjutan secara tepat dalam ruang multidimensi.

Nilai *stress* menunjukkan tingkat kesalahan atau penyimpangan model dalam merepresentasikan data asli ke dalam bentuk ordinasi multidimensi. Semakin kecil nilai *stress*, maka semakin baik model tersebut dalam menggambarkan kondisi aktual di lapangan. Menurut Kavanagh dan Pitcher (2004), model MDS dikatakan layak apabila nilai *stress* berada di bawah 0,25. Sementara itu, koefisien determinasi (R^2) menunjukkan tingkat kecocokan model terhadap data, di mana semakin mendekati nilai 1 maka semakin tinggi tingkat akurasi model.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada sistem perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga, diperoleh nilai *stress* sebesar 0,14 dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,93. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model yang digunakan memiliki tingkat kesalahan yang rendah dan tingkat kecocokan yang sangat tinggi dalam menggambarkan status keberlanjutan sistem perkebunan kakao.

Tabel 4.5. Hasil Uji Validitas Model MDS

Parameter	Nilai	Standar	Keterangan
Stress	0,14	<0,25	Valid
R^2	0,93	>0,80	Sangat Baik

Nilai *stress* sebesar 0,14 mengindikasikan bahwa konfigurasi ordinasi MDS memiliki tingkat distorsi yang rendah, sehingga hasil pemetaan indeks keberlanjutan dapat dianggap representatif terhadap kondisi aktual sistem perkebunan kakao di lapangan. Dengan kata lain, hubungan antar atribut keberlanjutan pada dimensi lingkungan, ekonomi, dan sosial telah berhasil divisualisasikan secara cukup akurat dalam model multidimensi. Di sisi lain, nilai R^2 sebesar 0,93 menunjukkan bahwa sebesar 93% variasi data keberlanjutan dapat dijelaskan oleh model MDS yang digunakan. Nilai ini mencerminkan bahwa model memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menangkap pola hubungan antar atribut keberlanjutan. Tingginya nilai koefisien determinasi juga memperkuat bahwa hasil indeks keberlanjutan yang diperoleh memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi dan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan pengelolaan perkebunan.

Hasil validitas model ini juga diperkuat oleh uji *Monte Carlo* yang sebelumnya menunjukkan selisih indeks yang relatif kecil antara hasil ordinasi utama dan simulasi pengulangan. Kombinasi antara nilai *stress* yang rendah, R^2 yang tinggi, dan stabilitas hasil *Monte Carlo* menunjukkan bahwa model RAP-Kakao berbasis MDS yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kualitas analisis yang baik, stabil, dan dapat diandalkan. Dengan demikian, validitas model yang diperoleh membuktikan bahwa pendekatan MDS merupakan metode yang efektif untuk mengevaluasi keberlanjutan sistem perkebunan kakao secara multidimensi. Hasil ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk melanjutkan analisis pada

tahap pembahasan serta penyusunan rekomendasi strategis bagi peningkatan keberlanjutan sistem perkebunan kakao di Kabupaten Malaka.

7. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya jumlah responden yang relatif terbatas dan hanya dilakukan pada satu lokasi perkebunan, sehingga generalisasi hasil penelitian masih terbatas pada kondisi agroekosistem yang serupa. Selain itu, sistem penilaian berbasis skor ordinal dalam metode *Multidimensional Scaling* (MDS) masih memiliki potensi subjektivitas dalam proses penentuan skor atribut. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan cakupan wilayah yang lebih luas serta penambahan dimensi kelembagaan dan teknologi sangat diperlukan untuk memperoleh gambaran keberlanjutan yang lebih komprehensif.

8. Implikasi Praktis

Hasil penelitian ini memberikan implikasi praktis bagi perusahaan perkebunan dalam merancang strategi pengelolaan yang lebih berkelanjutan, khususnya dalam pengurangan penggunaan pestisida, optimalisasi pengelolaan limbah kebun, serta peningkatan kapasitas tenaga kerja. Upaya tersebut dapat meningkatkan efisiensi produksi sekaligus menjaga stabilitas ekologis dan sosial dalam sistem perkebunan. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi dasar pertimbangan bagi pemerintah daerah dalam menyusun kebijakan pengembangan kakao berkelanjutan pada wilayah lahan kering, terutama dalam mendukung program pelatihan tenaga kerja, penguatan sistem pengelolaan lingkungan, serta penerapan teknologi budidaya yang lebih adaptif terhadap kondisi agroekosistem lokal. Secara akademik, penelitian ini juga memperkaya kajian mengenai evaluasi keberlanjutan perkebunan kakao di Indonesia, khususnya pada wilayah Indonesia Timur yang selama ini masih relatif terbatas dalam literatur ilmiah.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai penilaian keberlanjutan sistem perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga, Kabupaten Malaka, menggunakan pendekatan *Multidimensional Scaling* (MDS) melalui metode RAP-Kakao, dapat disimpulkan bahwa sistem perkebunan kakao di lokasi penelitian berada pada kategori cukup berkelanjutan dengan nilai indeks keberlanjutan total sebesar 63,47. Nilai ini menunjukkan bahwa secara umum pengelolaan perkebunan kakao telah memiliki dasar yang cukup baik dalam mendukung keberlanjutan jangka panjang, meskipun masih terdapat beberapa aspek yang memerlukan perbaikan untuk mencapai kondisi yang lebih optimal.

Berdasarkan hasil analisis per dimensi, dimensi ekonomi menunjukkan nilai indeks tertinggi sebesar 71,25, yang mengindikasikan bahwa aspek ekonomi seperti stabilitas hasil panen, efisiensi biaya produksi, dan efektivitas pengelolaan kebun telah berjalan relatif baik. Sementara itu, dimensi sosial memperoleh nilai sebesar 61,38, yang menunjukkan bahwa hubungan kerja, sistem upah, dan partisipasi tenaga kerja berada pada kategori cukup baik, namun masih terdapat kelemahan pada aspek pelatihan tenaga kerja dan keselamatan kerja. Dimensi lingkungan menjadi dimensi dengan nilai terendah sebesar 57,79, yang menunjukkan bahwa pengelolaan lingkungan masih menjadi tantangan utama dalam sistem perkebunan kakao di lokasi penelitian.

Hasil analisis leverage menunjukkan bahwa atribut yang paling sensitif dalam memengaruhi keberlanjutan sistem perkebunan kakao meliputi intensitas penggunaan pestisida, pengelolaan limbah kebun, stabilitas hasil panen, pelatihan tenaga kerja, dan keselamatan kerja. Atribut-atribut tersebut menjadi faktor prioritas yang harus diperbaiki untuk meningkatkan nilai keberlanjutan secara keseluruhan.

Hasil uji validitas model menunjukkan nilai *stress* sebesar 0,14 dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,93, yang menunjukkan bahwa model MDS yang digunakan memiliki tingkat akurasi dan reliabilitas yang sangat baik. Selain itu, hasil simulasi *Monte Carlo*

menunjukkan selisih indeks yang rendah, sehingga memperkuat stabilitas model dalam menggambarkan kondisi aktual keberlanjutan sistem perkebunan kakao.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan RAP-Kakao berbasis MDS dapat digunakan secara efektif untuk menilai keberlanjutan sistem perkebunan kakao secara multidimensi, khususnya pada agroekosistem lahan kering di wilayah Kabupaten Malaka.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk meningkatkan keberlanjutan sistem perkebunan kakao di PT. Timor Mitra Niaga antara lain adalah perlunya pengurangan ketergantungan terhadap penggunaan pestisida kimia melalui penerapan pengendalian hama terpadu yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, pengelolaan limbah kebun perlu ditingkatkan agar dapat mendukung efisiensi penggunaan sumber daya dan menjaga kualitas lingkungan perkebunan.

Peningkatan kapasitas sumber daya manusia juga perlu menjadi perhatian utama, terutama melalui penyelenggaraan program pelatihan tenaga kerja secara berkala, peningkatan standar keselamatan kerja, serta penguatan partisipasi pekerja dalam proses pengambilan keputusan teknis di lapangan. Langkah ini diharapkan dapat meningkatkan kualitas tenaga kerja sekaligus memperkuat dimensi sosial keberlanjutan.

Bagi pihak perusahaan, hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai dasar dalam menyusun strategi pengelolaan perkebunan kakao yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan, khususnya pada kondisi agroekosistem lahan kering. Sementara itu, bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk mengembangkan penelitian keberlanjutan dengan menambahkan dimensi kelembagaan dan teknologi agar diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai sistem perkebunan kakao berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afoakwa, E. O., Quao, J., Takrama, J., Budu, A. S., & Saalia, F. K. (2019). Chemical composition and physical quality characteristics of Ghanaian cocoa beans as affected by pulp pre-conditioning and fermentation. *Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 706–714. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3524-7>
- Bunn, C., Lundy, M., Läderach, P., & Castro, F. (2021). Global climate change impacts on cocoa production and adaptation strategies. *Agricultural Systems*, 189, 103042. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103042>
- Clough, Y., Barkmann, J., Jührbandt, J., Kessler, M., Wanger, T. C., Anshary, A., Buchori, D., Cicuzza, D., Darras, K., Dwi Putra, D., Erasmi, S., Pitopang, R., Schmidt, C., Schulze, C. H., Seidel, D., Steffan-Dewenter, I., Stenchly, K., Vidal, S., Weist, M., Wielgoss, A. C., & Tscharntke, T. (2016). Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8311–8316. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016799108>
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2023). *Statistik perkebunan Indonesia: Kakao 2022–2024*. Direktorat Jenderal Perkebunan.
- Djalante, R., & Thomalla, F. (2022). Sustainable agricultural systems in dryland ecosystems: Challenges and adaptation pathways in Southeast Asia. *Sustainability Science*, 17(4), 1211–1226. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-01079-3>
- Food and Agriculture Organization. (2023). *FAOSTAT statistical database: Crops and livestock products*. FAO. <https://www.fao.org/faostat/>
- Gockowski, J., Afari-Sefa, V., & Sarpong, D. B. (2020). Economic sustainability of cocoa farming systems under environmental constraints. *Agricultural Economics*, 51(6), 835–847. <https://doi.org/10.1111/agec.12585>
- International Cocoa Organization. (2024). *Quarterly bulletin of cocoa statistics 2023/2024*. ICCO. <https://www.icco.org/>

- Issaka, R. N., Fening, K. O., & Amoako, P. K. (2021). Pesticide use intensity and ecological risks in cocoa farming systems in West Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(9), 571. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09376-9>
- Kavanagh, P., & Pitcher, T. J. (2004). *Implementing Microsoft Excel software for RAPFISH: A technique for the rapid appraisal of fisheries status*. Fisheries Centre, University of British Columbia.
- Läderach, P., Martinez-Valle, A., Schroth, G., & Castro, N. (2022). Agroforestry systems as a sustainability pathway for climate-resilient cocoa production. *Agroforestry Systems*, 96(3), 411–425. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00685-2>
- Lahive, F., Hadley, P., & Daymond, A. J. (2019). The impact of elevated CO₂ and water deficit stress on growth and photosynthesis of juvenile cocoa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.011>
- Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2021). Agroforestry for sustainability of tropical plantation systems. *Land Use Policy*, 104, 105357. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105357>
- Nugroho, B., Santosa, H., & Prasetyo, A. (2023). Sustainability assessment of plantation-based agricultural systems in eastern Indonesia using multidimensional scaling approach. *Biodiversitas*, 24(8), 4487–4496. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240842>
- Ofori-Boateng, K., Acquah, H. D., & Frimpong, S. (2024). Social sustainability and labor welfare in cocoa plantation systems: A multidimensional analysis. *Heliyon*, 10(3), e25677. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25677>
- Pitcher, T. J., & Preikshot, D. (2001). RAPFISH: A rapid appraisal technique to evaluate the sustainability status of fisheries. *Fisheries Research*, 49(3), 255–270. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(00\)00205-8](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(00)00205-8)
- Prasetyo, T., Widodo, S., & Kurniawan, D. (2022). Multidimensional sustainability analysis of agricultural commodities using RAPFISH-based models in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 974(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/974/1/012045>
- Rahmah, N., Supriyadi, S., & Widodo, S. (2024). Sustainability assessment of cocoa farming systems in Indonesia: Integrating environmental, economic, and social dimensions. *Heliyon*, 10(8), e28761. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28761>
- Resnik, D. B. (2020). *The ethics of research with human subjects: Protecting people, advancing science, promoting trust*. Springer.
- Schroth, G., Läderach, P., Martinez-Valle, A. I., Bunn, C., & Jassogne, L. (2016). Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation. *Science of the Total Environment*, 556, 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.024>
- Wahyuni, S., Rahman, A., & Putra, H. (2023). Environmental sustainability challenges in dryland plantation agriculture in Indonesia. *Sustainability*, 15(9), 7248. <https://doi.org/10.3390/su15097248>