

Karakterisasi Morfologi dan Analisis Kluster Aksesori Kopi (*Coffea* sp.) Asal Seram Bagian Selatan, Indonesia

Morphological Characterization and Cluster Analysis of Coffee (*Coffea* sp.) Accessions From Southern Seram, Indonesia

Marlan E. Unto, Henry Kesaulya^{*}, Simon H. T. Raharjo

Program Studi Pemuliaan Tanaman, Jurusan Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura,
Jalan Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Ambon 97233, Indonesia

^{*}E-mail Penulis Korespondensi: henry.unpat@gmail.com

ABSTRACT

As a coffee cultivation region, the southern part of Seram Island has many types of coffee grown by farmers who grow coffee there. This study aimed to assess the morphological diversity of coffee (*Coffea* sp.) accessions cultivated in southern Seram, particularly in the subdistricts of Tehoru and Amahai, and to classify these accessions based on morphological similarities using hierarchical cluster analysis. A total of 45 accessions were observed, comprising 16 arabica and 29 robusta types. Morphological traits analyzed included shapes of stems, leaves, flowers, and fruits, that were based on descriptors established by IPGRI and the morphological classification method. The results indicated that arabica accessions were grouped into four clusters with similarity levels ranging from 22.99% to 38.30%, while Robusta accessions were grouped into three clusters with similarity values between 5.39% and 39.59%. These findings suggest a high degree of morphological diversity among local accessions, reflecting potential genetic variation and adaptation to their growing environments. This study provides essential baseline information for germplasm conservation and may serve as a reference for selecting superior parental lines to support adaptive and sustainable coffee breeding programs tailored to the specific agroecological conditions of southern Seram.

Keywords: coffee accessions, cluster analysis, germplasm, morphological diversity

ABSTRAK

Sebagai wilayah budidaya kopi, bagian selatan Pulau Seram memiliki banyak jenis kopi yang ditanam oleh petani yang menanam kopi di sana. Penelitian ini bertujuan untuk mengases keragaman morfologi aksesori kopi (*Coffea* sp.) yang dibudidayakan di wilayah Seram Bagian Selatan, khususnya di Kecamatan Tehoru dan Amahai, serta mengelompokkan aksesori tersebut berdasarkan kesamaan morfologi menggunakan analisis kluster hierarkis. Sebanyak 45 aksesori diamati, terdiri atas 16 aksesori Arabika dan 29 aksesori Robusta. Karakter morfologi yang dianalisis meliputi struktur batang, daun, bunga, dan buah, dengan mengacu pada deskriptor morfologi yang disusun oleh IPGRI serta metode klasifikasi morfologi. Hasil analisis menunjukkan bahwa aksesori Arabika terbagi ke dalam empat kluster dengan tingkat kemiripan berkisar antara 22,99% hingga 38,30%, sedangkan aksesori Robusta terbagi ke dalam tiga kluster dengan tingkat kemiripan antara 5,39% hingga 39,59%. Temuan ini mengindikasikan adanya keragaman morfologi yang tinggi antar aksesori lokal, yang mencerminkan potensi variasi genetik dan adaptasi terhadap lingkungan tumbuh. Hasil penelitian ini menyediakan informasi dasar yang penting bagi konservasi plasma nutfah dan dapat dimanfaatkan dalam pemilihan tetua unggul untuk mendukung program pemuliaan kopi yang adaptif dan berkelanjutan sesuai dengan kondisi agroekologi wilayah Seram Bagian Selatan.

Kata Kunci: aksesori kopi, analisis kluster, karakter morfologi, plasma nutfah

PENDAHULUAN

Kopi (*Coffea* sp.) merupakan salah satu komoditas perkebunan paling penting secara ekonomi di dunia. Tanaman ini berasal dari wilayah tropis Afrika, terutama dataran tinggi Ethiopia, di mana *Coffea arabica* berevolusi dan pertama kali dikonsumsi serta dibudidayakan. Penyebarannya ke berbagai belahan dunia dimulai pada abad ke-17 melalui jalur perdagangan dan kolonisasi, termasuk ke Indonesia oleh kolonial Belanda yang membawa tanaman kopi pertama ke Jawa pada tahun 1696 (Clarence-Smith & Topik, 2003). Hingga saat ini, kopi tetap menjadi komoditas global utama dan memainkan peran penting dalam perekonomian negara-negara penghasil, termasuk Indonesia, yang merupakan produsen kopi terbesar ketiga di dunia. Lebih dari 71% kopi yang diproduksi di Indonesia diekspor ke pasar internasional, menunjukkan tingginya kontribusi terhadap neraca perdagangan nasional (Andini *et al.*, 2021). Studi oleh Tampubolon *et al.*, (2023) mengemukakan bahwa kopi tidak hanya menjadi sumber devisa penting, tetapi juga memiliki peran sosial dan ekologis yang signifikan dalam pembangunan perdesaan di Indonesia.

Produksi kopi dunia pada tahun 2022/2023 mencapai sekitar 168,2 juta kantong 60 kg (setara $\pm 10,2$ juta ton), dengan Brasil sebagai produsen terbesar diikuti oleh Vietnam, dan Indonesia yang berada di posisi ketiga dengan produksi sekitar 711 ribu ton, sebagaimana dilaporkan oleh (Ngure & Watanabe, 2024). Di Indonesia, tiga spesies kopi yang paling umum dibudidayakan adalah *Coffea arabica* (kopi Arabika) *Coffea canephora* (kopi Robusta), dan *Coffea liberica* (kopi liberika) yang tersebar luas dari dataran tinggi hingga wilayah dataran rendah dengan kondisi agroekologi yang sangat beragam. Ketiga spesies ini tidak hanya berbeda secara morfologis dan fisiologis, tetapi juga menunjukkan adaptasi spesifik terhadap kondisi lingkungan dan kebutuhan pasar lokal dan global (Krishnan *et al.*, 2021; Nadaf *et al.*, 2024).

Maluku memiliki potensi besar dalam pengembangan tanaman kopi karena kondisi agroekologi yang mendukung, seperti curah hujan yang seimbang, elevasi yang sesuai, serta tipe tanah yang mendukung pertumbuhan kopi berkualitas. Selain menjadi sumber utama pendapatan petani, kopi juga memainkan peran penting dalam struktur sosial dan budaya komunitas lokal, termasuk dalam ritual adat, tradisi gotong royong, dan simbol identitas komunitas, sebagaimana dijelaskan oleh Andini *et al.* (2021) dalam konteks komunitas kopi di Indonesia.

Maluku Tengah dapat dikembangkan sebagai salah satu sentra produksi kopi di Provinsi Maluku, dengan luas lahan perkebunan mencapai 541,40 hektar pada tahun 2021, yang sedikit menurun menjadi 538,40 hektar pada tahun 2022 (BPS, 2023). Kecamatan Tehoru dan Amahai yang ada di bagian selatan Kabupaten Maluku Tengah tercatat sebagai wilayah penghasil kopi terbesar kedua dan keempat di kabupaten tersebut, dengan masing-masing luas kebun 108 hektar dan produksi sebesar 76,20 ton pada tahun 2021. Potensi ini didukung oleh kondisi agroekologi seperti ketinggian, curah hujan, dan struktur tanah yang cocok untuk budidaya kopi berkualitas, dimana Indonesia memiliki kesesuaian lahan tinggi untuk pengembangan kopi berdasarkan zonasi agroekologi.

Meskipun kopi telah lama dibudidayakan secara turun-temurun, informasi ilmiah mengenai jenis dan karakteristik kopi lokal di wilayah Seram bagian selatan masih sangat terbatas, yang menyebabkan pengembangan varietas unggul dan pelestarian sumber daya genetik kopi terhambat. Hal ini sejalan dengan laporan Krishnan *et al.* (2021) yang menekankan kerentanan sumber daya genetik kopi global akibat keterbatasan dokumentasi lokal.

Di sisi lain, budidaya kopi di Indonesia juga menghadapi tantangan besar berupa serangan organisme pengganggu tanaman (OPT), terutama penggerek buah kopi (*Hypothenemus hampei*), yang diketahui dapat menurunkan hasil panen hingga 80% dan memengaruhi mutu serta cita rasa biji kopi. Penelitian terbaru di Sumatra oleh Sitompul *et al.* (2025) mengungkap adanya variasi genetik pada populasi *H. hampei*, dan hasil penelitian ini penting untuk strategi pengendalian berbasis ekologi dan genetika.

Salah satu pendekatan yang efektif untuk menghadapi tantangan tersebut adalah melalui eksplorasi dan karakterisasi keragaman morfologi tanaman kopi lokal. Evaluasi morfologi merupakan langkah awal penting dalam program pemuliaan tanaman dan konservasi plasma nutfah, karena mencerminkan variasi genetik yang dapat dimanfaatkan dalam pemilihan varietas unggul (Andini *et al.*, 2021). Informasi morfologi ini juga bermanfaat untuk analisis kluster, yang memungkinkan pengelompokan aksesori berdasarkan kemiripan karakter dan mendukung seleksi tetua adaptif dan berdaya hasil tinggi (Maghuly *et al.*, 2020).

Penelitian ini mengevaluasi keragaman morfologi aksesori kopi dari Seram bagian selatan, khususnya Kecamatan Tehoru dan Amahai, dengan fokus pada karakter pohon, daun, bunga, dan buah. Melalui penggunaan deskriptor morfologi standar dan analisis kluster hierarkis, studi ini mengelompokkan aksesori berdasarkan kemiripan fenotipik untuk mendukung konservasi dan pemuliaan varietas adaptif. Sebagai dokumentasi ilmiah pertama terhadap morfologi kopi lokal dari wilayah ini, temuan penelitian ini dapat berkontribusi nyata terhadap pelestarian plasma nutfah dan pemilihan tetua unggul berbasis agroekologi.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember tahun 2023 di bagian selatan Pulau Seram, yaitu pada Kecamatan Amahai, meliputi desa-desa Aira, Sepa, Meu, Tamilow, Kampung Baru, Hollo, dan Nua Nea; serta di Kecamatan Tehoru, pada desa-desa Haya, Salamahu, dan Sakanusa.

Alat dan Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tanaman kopi, deskriptor morfologi yang merujuk pada *Key Characterization and Evaluation Descriptor: Methodologies for the Assessment of 22 Crops* (Alercia, 2011). Warna organ tanaman diamati menggunakan RHS Colour Chart (2001).

Peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah GPS, penggaris, meteran, timbangan, kamera digital, jangka sorong, alat tulis, pita meteran, serta *smart measure*.

Pelaksanaan Penelitian

Metode yang digunakan adalah survey lapangan, identifikasi keragaman kopi merujuk pada deskriptor karakter morfologi tanaman kopi yang mengacu pada *Key Characterization and Evaluation Descriptor: Methodologies for the Assessment of 22 Crops* (Alercia, 2011) dengan mengamati dan mengukur abjek individu tanaman kopi sebagai objek

pengamatan. Metode ini digunakan untuk memberi gambaran dan analisis terhadap objek yang diteliti melalui data sampel yang telah nyata terjadi di lapangan. Pohon yang digunakan sebagai sampel pengamatan morfologi adalah pohon yang telah berbuah.

Analisis Data

Data hasil pengamatan di lapangan dianalisis menggunakan program statistik Minitab 21 untuk mengelompokkan aksesori-aksesori berdasarkan persamaan morfologi yang ada pada tanaman kopi. Data yang telah dianalisis dibuat dan disajikan dalam bentuk dendrogram untuk melihat adanya kemiripan aksesori-aksesori kopi berdasarkan karakter-karakter morfologi yang berbeda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Seram Bagian Selatan, tepatnya di Kecamatan Amahai dan Kecamatan Tehoru, yang secara administratif termasuk dalam Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. Secara geografis, Kabupaten Maluku Tengah terletak antara 2°30' hingga 7°30' Lintang Selatan dan 125° hingga 132°30' Bujur Timur. Wilayah ini berbatasan dengan Laut Seram di sebelah utara, Laut Banda di sebelah selatan, Kabupaten Seram Bagian Barat di sebelah barat, dan Kabupaten Seram Bagian Timur di sebelah timur. Kabupaten Maluku Tengah memiliki luas total 275.907 km², terdiri atas wilayah laut seluas 264.311,43 km² dan daratan seluas 11.595,57 km². Secara administratif, wilayah ini mencakup 19 kecamatan, 6 kelurahan, dan 186 negeri. Iklim di Kabupaten Maluku Tengah tergolong iklim laut tropis yang dipengaruhi oleh posisi geografisnya yang dikelilingi perairan. Pola iklim di wilayah ini umumnya mengikuti ritme iklim musiman tropis, dengan tingkat kelembapan dan curah hujan yang cukup tinggi sepanjang tahun.

Morfologi Pohon

Tanaman kopi yang diamati memiliki rata-rata tinggi sekitar 6 meter. Aksesori dengan tinggi tertinggi ditemukan di Desa Aira, yaitu mencapai 10 meter, sedangkan tanaman terendah tercatat di Desa Hollo dengan tinggi 2,55 meter. Berdasarkan bentuk tajuk, terdapat dua tipe utama pohon kopi yang teridentifikasi, yaitu bentuk lebat dan bentuk memanjang menyerupai kerucut. Tipe pohon berbentuk kerucut dijumpai pada aksesori AR 01 dan AR 02 (Desa Aira), NN 01 dan NN 02 (Desa Nua Nea), serta SP 01 dan SP 02 (Desa Sepa). Sementara itu, tipe tajuk lebat ditemukan pada berbagai aksesori, antara lain: KB 01–05 (Desa Kampung Baru), HL 01–03 (Desa Hollo), ME 01–05 (Desa Meu), SK 01–05 (Desa Sakanussa), HY 01–05 (Desa Haya), SL 01–05 (Desa Salamahu), NN 01–03 (Desa Nua Nea), TM 01–03 (Desa Tamilow), dan SP 01–03 (Desa Sepa) (Gambar 1).

Variasi bentuk tajuk dan tinggi tanaman kopi mencerminkan adanya perbedaan karakter morfologi antar aksesori, yang dapat dipengaruhi oleh faktor genetik, lingkungan tumbuh, maupun interaksi antara keduanya. Variasi ini merupakan indikator penting dalam proses seleksi dan pemuliaan tanaman karena berkaitan langsung dengan potensi pertumbuhan, efisiensi pemanfaatan sumber daya, serta produktivitas tanaman (Alberto *et al.*, 2024; Chidoko *et al.*, 2022; Degefa *et al.*, 2021). Arsitektur tanaman yang baik, termasuk tinggi dan struktur percabangan, berperan penting dalam penetrasi cahaya, efisiensi fotosintesis, serta kemudahan pemanenan dan manajemen budidaya (Alberto *et al.*, 2024; Sultana *et al.*, 2023).

Perubahan kecil antar individu yang tidak selalu tampak secara kasatmata dapat memengaruhi ekspresi morfologi tanaman, termasuk arsitektur tajuk dan pola percabangan, sebagai hasil dari interaksi antara genetik dan lingkungan (Silva *et al.*, 2025). Selain itu, tinggi tanaman merupakan salah satu komponen utama dalam kompetisi tanaman untuk mendapatkan cahaya, yang secara langsung memengaruhi efisiensi fotosintesis dan adaptasi terhadap lingkungan sekitar. Aksesori kopi Arabika menunjukkan bahwa variasi lingkungan lokal berdampak signifikan terhadap perbedaan tinggi batang dan struktur kanopi, yang menegaskan pentingnya evaluasi morfologi dalam konteks agroekologi (Breitler *et al.*, 2022; Getahun *et al.*, 2024).

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa variasi fenotipik seperti tinggi dan bentuk tajuk dapat digunakan sebagai indikator awal dalam identifikasi aksesori unggul (Gebreselassie *et al.*, 2024). Selain itu, faktor lingkungan seperti ketersediaan air, intensitas cahaya, dan kondisi tanah turut memengaruhi ekspresi karakter morfologi, menunjukkan adanya interaksi genotipe-lingkungan yang signifikan dalam sistem agroforestri kopi (Getahun *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2025). Oleh karena itu, analisis morfologi yang komprehensif sangat penting dalam mendukung program konservasi dan pemuliaan kopi yang berbasis data ilmiah dan adaptasi lokal (Breitler *et al.*, 2022).

Variasi diameter batang tanaman kopi menunjukkan perbedaan yang signifikan antar lokasi. Nilai tertinggi tercatat sebesar 78 cm, yang ditemukan di Desa Salamahu dan Desa Aira, sedangkan diameter batang terkecil, yaitu 17 cm, diamati pada tanaman di Desa Hollo. Temuan ini konsisten dengan laporan bahwa pohon yang lebih tua umumnya memiliki lingkaran batang yang lebih besar karena proses pertumbuhan sekunder yang berkelanjutan (Gebreselassie *et al.*, 2024). Diameter batang juga dipengaruhi oleh kerapatan tanam, kondisi tanah, dan ketersediaan hara, yang memengaruhi pertumbuhan jaringan kayu (Silva *et al.*, 2025).

Warna batang tanaman kopi yang diamati di lapangan menunjukkan variasi dari coklat tua hingga putih keabuan, yang kemungkinan mencerminkan perbedaan varietas, usia tanaman, serta faktor lingkungan seperti kelembapan dan intensitas cahaya. Variasi ini mungkin berkaitan dengan akumulasi senyawa fenolik dan respons adaptif terhadap mikroklimat lokal (Getahun *et al.*, 2024).

Rata-rata tinggi batang menuju percabangan pertama adalah 40 cm, dengan nilai tertinggi 76 cm (Desa Meu) dan terendah 20 cm (Desa Kampung Baru). Sistem perakaran tanaman kopi, yang terdiri dari akar tunggang kuat dan akar serabut menyebar, memainkan peran penting dalam penyerapan air, hara, dan stabilitas tanaman di berbagai kondisi agroekologi (Breitler *et al.*, 2022).

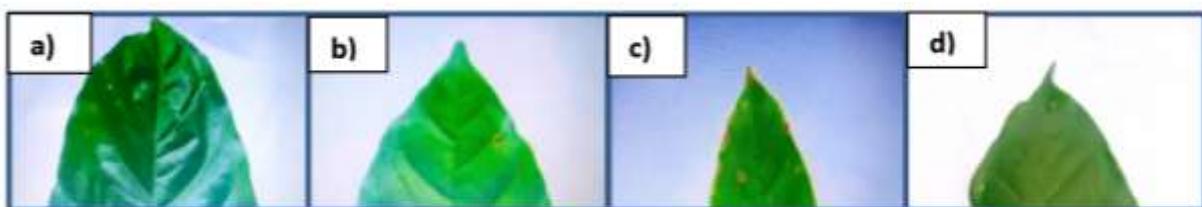


Gambar 1. Bentuk pohon kopi; a). lebat. b). memanjang berbentuk kerucut.

Morfologi Daun

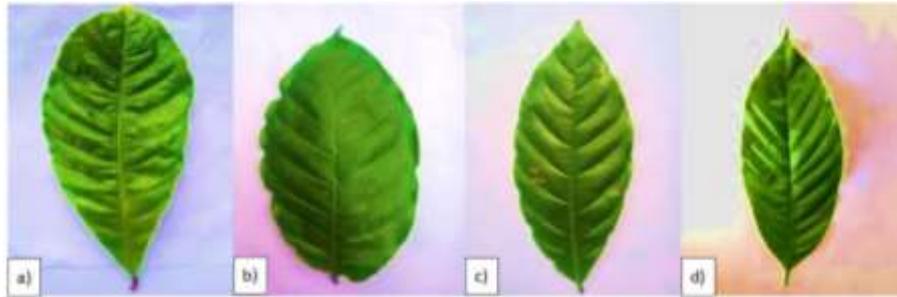
Helai daun tanaman kopi umumnya berbentuk lonjong dengan ujung dan pangkal yang meruncing, serta memiliki warna hijau yang khas. Tepi daun bersifat berlekuk dangkal, sedangkan pola pertulangan daun bertipe menyirip, dengan satu tulang daun utama yang memanjang dari pangkal hingga ujung helai daun. Daun kopi tergolong dalam kelompok daun tunggal, yaitu hanya terdapat satu helai daun pada setiap tangkai. Ukuran dan bentuk daun dapat mengalami perubahan morfologis yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan, termasuk ketersediaan air, intensitas cahaya, serta kandungan unsur hara dalam tanah (Silva *et al.*, 2025).

Pada lingkungan dengan ketersediaan air dan nutrisi yang rendah, ukuran daun cenderung lebih kecil dan tipis. Perubahan ini merupakan bentuk respons fenotipik adaptif yang mencerminkan kemampuan fisiologis tanaman dalam menghadapi tekanan lingkungan (Beksisa, 2021; Getahun *et al.*, 2024). Studi terbaru menunjukkan bahwa perubahan iklim mikro seperti peningkatan suhu dan penurunan kelembapan juga berpengaruh signifikan terhadap morfologi dan luas permukaan daun, yang pada gilirannya memengaruhi efisiensi fotosintesis dan produktivitas tanaman kopi (Weldemichael Abrha *et al.*, 2022).



Gambar 2. Bentuk ujung daun; (a) ujung daun tumpul, (b) ujung daun akut. (c) ujung daun menimbulkan, (d) ujung daun apikulat.

Selain itu, keragaman genetik antar kultivar turut menentukan variasi bentuk dan ukuran daun, yang menjadi indikator penting dalam pemuliaan tanaman dan adaptasi terhadap zona agroekologi yang berbeda. Variasi dalam ukuran morfologi daun ini tidak hanya mencerminkan keragaman genetik antar aksesori, tetapi juga menunjukkan respons fenotipik terhadap kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya, ketersediaan air, dan nutrisi. Panjang dan lebar daun merupakan parameter penting yang digunakan dalam klasifikasi morfologi tanaman kopi, karena berhubungan langsung dengan potensi fotosintesis dan efisiensi penggunaan cahaya. Selain itu, studi morfometrik pada berbagai genotipe kopi menunjukkan bahwa variasi ukuran daun dapat digunakan sebagai indikator adaptasi terhadap agroekosistem lokal dan dapat diintegrasikan dalam pemilihan varietas unggul (Getahun *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2025).



Gambar 3. Bentuk daun kopi; a). *obovate*, b). bulat telur, c). elips, d). lanset

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa tekstur permukaan daun kopi menunjukkan variasi yang jelas, yaitu antara mengilap dan tidak mengilap. Daun dengan permukaan mengilap ditemukan pada sejumlah aksesori seperti NN 04 dan 05 (Desa Nua Nea), TM 02–05 (Desa Tamilow), SL 02 dan 04 (Desa Salamahu), SK 01, 04, dan 05 (Desa Sakanussa), HY 02–04 (Desa Haya), ME 01 (Desa Meu), AR 02 (Desa Aira), HL 03 (Desa Hollo), SP 01–03 dan 05 (Desa Sepa), serta KB 01 dan 02 (Desa Kampung Baru). Sebaliknya, permukaan daun yang tidak mengilap ditemukan pada aksesori KB 03–05 (Desa Kampung Baru), SP 04 (Desa Sepa), AR 01 (Desa Aira), HL 01 dan 02 (Desa Hollo), ME 02–05 (Desa Meu), HY 01 dan 05 (Desa Haya), TM 01 (Desa Tamilow), SK 02 dan 03 (Desa Sakanussa), NN 01–03 (Desa Nua Nea), serta SL 01 dan 03–05 (Desa Salamahu).

Variasi dalam tekstur permukaan daun ini diduga berkaitan erat dengan perbedaan varietas, umur daun, serta adaptasi terhadap kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya dan kelembaban udara. Permukaan daun yang mengilap sering kali berhubungan dengan ketebalan kutikula dan kandungan senyawa lilin epikutikular, yang berfungsi sebagai mekanisme protektif terhadap kehilangan air dan radiasi UV (Sauvadet *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2025). Sebaliknya, daun yang tidak mengilap cenderung memiliki lapisan kutikula lebih tipis dan permeabel, yang bisa memengaruhi laju transpirasi dan efisiensi fotosintesis di lingkungan lembap atau teduh (Urugo *et al.*, 2024). Variabilitas tampilan morfologi daun, termasuk kilap permukaan, dapat dijadikan indikator fisiologis yang penting dalam evaluasi keragaman genetik dan ketahanan terhadap stres abiotik pada tanaman kopi (Getahun *et al.*, 2024; Ndikumana, 2022).

Variasi bentuk helaian daun pada tanaman kopi yang diamati dalam penelitian ini menunjukkan keberagaman morfologi yang diklasifikasikan ke dalam empat tipe utama, yaitu obovat, bulat telur (*ovate*), elips (*elliptic*), dan lanset (*lanceolate*). Bentuk obovat ditemukan pada aksesori SP 05 (Desa Sepa), sedangkan bentuk bulat telur dijumpai pada aksesori KB 02 dan 03 (Desa Kampung Baru) serta SP 02 (Desa Sepa). Bentuk elips ditemukan pada aksesori NN 01, 02, dan 04 (Desa Nua Nea), seluruh aksesori dari Desa Salamahu (SL 01–05), TM 02 dan 03 (Desa Tamilow), SK 04 dan 05 (Desa Sakanussa), HY 01–04 (Desa Haya), ME 01 (Desa Meu), AR 01 (Desa Aira), serta SP 01, 03, dan 04 (Desa Sepa). Sementara itu, bentuk lanset ditemukan pada aksesori KB 01, 04, dan 05 (Desa Kampung Baru), AR 02 (Desa Aira), HL 01–03 (Desa Hollo), ME 02–05 (Desa Meu), HY 05 (Desa Haya), SK 01–03 (Desa Sakanussa), TM 01, 04, dan 05 (Desa Tamilow), serta NN 03 dan 04 (Desa Nua Nea).

Selain bentuk helaian, ujung daun juga menunjukkan keragaman yang dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama, yaitu akut, menimbul (*mucronate*), dan apikulat (*apiculate*). Bentuk ujung daun akut ditemukan pada aksesori SP 02–05 (Desa Sepa), AR 01 dan 02 (Desa Aira), seluruh aksesori dari Desa Sakanussa (SK 01–05), TM 01–03 (Desa Tamilow), SL 01–03 (Desa Salamahu), serta NN 01 dan 02 (Desa Nua Nea). Bentuk ujung daun menimbul dijumpai pada aksesori SL 04 dan 05 (Desa Salamahu), TM 04 dan 05 (Desa Tamilow), ME 04 dan 05 (Desa Meu), HL 03 (Desa Hollo), serta KB 01, 03, dan 04 (Desa Kampung Baru). Sementara itu, bentuk ujung daun apikulat ditemukan pada aksesori NN 03, 04, dan 05 (Desa Nua Nea), HL 01 dan 02 (Desa Hollo), HY 01–04 (Desa Haya), ME 01–03 (Desa Meu), serta KB 02 (Desa Kampung Baru) (Gambar 2 dan 3).

Variasi bentuk helaian dan ujung daun tersebut mengindikasikan tingginya keragaman morfologi antar aksesori, yang mencerminkan perbedaan genetik maupun adaptasi fisiologis terhadap lingkungan tumbuh (Dutra Giles *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2025). Bentuk dan ukuran daun merupakan karakter penting dalam klasifikasi aksesori kopi karena berhubungan dengan efisiensi fotosintesis, ketahanan terhadap kekeringan, dan produktivitas (Chidoko *et al.*, 2022; Mishra *et al.*, 2011).

Morfologi daun, termasuk bentuk helaian dan ujung, memiliki nilai diagnostik tinggi dalam pemilihan tetua pemuliaan dan konservasi varietas kopi lokal (Ndikumana, 2022; Silva *et al.*, 2025). Selain itu, perbedaan ini dapat digunakan untuk menyusun klaster morfologi dalam studi filogenetik atau pemetaan sumber daya genetik (Alberto *et al.*, 2024; Arimarsetiowati *et al.*, 2023).

Morfologi dan Perkembangan Bunga

Bunga tanaman kopi umumnya muncul pada periode tertentu dalam satu tahun, yaitu sekitar bulan Juni–Juli, Oktober–November, November–Desember, serta Desember–Januari. Pembungaan kopi umumnya terjadi pada awal musim kemarau dan berkembang menjadi buah yang siap dipanen pada akhir musim kemarau. Fenomena ini berkaitan

erat dengan respons fisiologis tanaman terhadap perubahan kelembaban tanah dan curah hujan (da Silva Angelo, 2024; Unigarro *et al.*, 2023). Pada tahap anthesis (mekarnya bunga), berlangsung proses fertilisasi, yaitu peleburan antara sel jantan (spermatozoid) dan sel telur (oosfer) di dalam bakal biji (*ovule*) yang terletak di bakal buah (*ovary*). Proses ini sangat menentukan pembentukan buah yang sehat dan berisi (Silva *et al.*, 2024).

Beberapa hasil penelitian terbaru mengungkapkan bahwa fase dormansi kuncup bunga kopi sangat dipengaruhi oleh keberadaan periode kering yang cukup, yang berfungsi sebagai pemicu pembungaan serempak setelah terjadi hujan pertama (Ronchi & DaMatta, 2025; Unigarro *et al.*, 2023). Selain itu, suhu malam hari dan fluktuasi suhu harian juga memainkan peran penting dalam sinkronisasi pembungaan, terutama pada kopi Arabika (López *et al.*, 2021).

Pengamatan terhadap kalender fenologi pembungaan menjadi penting untuk memahami interaksi antara lingkungan dan ekspresi genetik pembungaan, serta sebagai dasar pengambilan keputusan dalam manajemen agronomi dan pemuliaan tanaman (López *et al.*, 2021). Perkembangan bunga menuju buah pada tanaman kopi menunjukkan variasi morfologis yang jelas, dan terdiri atas beberapa fase pertumbuhan berurutan, yakni: fase primordia, fase lilin (atau pinhead), anthesis (bunga mekar), mata yuyu, buah hijau, dan buah merah. Semua tahapan tersebut teramati dalam satu periode pengamatan yang sama, yang mengindikasikan perbedaan tingkat kematangan dan perkembangan morfologis antar aksesi kopi yang diuji (Silva *et al.*, 2024). Permulaan musim hujan ditandai dengan pemanjangan cabang primer dan pembentukan daun baru. Ketika memasuki musim kemarau, daun-daun baru tersebut memasuki fase fisiologis aktif yang merangsang induksi pembungaan. Perubahan ini berperan penting dalam sinkronisasi fase generatif tanaman kopi (Ronchi & DaMatta, 2025).

Pengamatan menunjukkan adanya variasi kuantitatif dalam organ bunga antar aksesi. Jumlah bunga per ketiak tertinggi adalah 17 kuntum, ditemukan pada aksesi dari Desa Hollo, sedangkan jumlah terendah, yaitu 3 kuntum per ketiak, ditemukan pada aksesi dari Desa Kampung Baru, Sepa, dan Salamahu. Jumlah bunga per fascicle paling tinggi mencapai 13 kuntum (aksesi Desa Nua Nea), dan jumlah terendah sebanyak 2 kuntum tercatat di Kampung Baru. Jumlah fasikula per ruas (node) juga menunjukkan keragaman signifikan, dengan jumlah maksimum 17 pada aksesi Kampung Baru, dan minimum 4 pada aksesi dari Desa Sepa, Aira, Sakanussa, Salamahu, Hollo, dan Nua Nea.

Variabilitas juga ditemukan pada struktur perhiasan bunga: jumlah kelopak per bunga berkisar antara 2 hingga 9, di mana nilai maksimum (9 kelopak) ditemukan pada aksesi dari Desa Kampung Baru, Sepa, Meu, Haya, Sakanussa, Salamahu, Tamilow, dan Nua Nea, sedangkan jumlah minimum (2 kelopak) pada beberapa aksesi dari Kampung Baru dan Sepa. Temuan ini selaras dengan laporan Silva *et al.* (2024) yang menunjukkan modifikasi morfologi bunga kopi pada berbagai ketinggian, serta dengan studi oleh Alberto *et al.* (2024) yang melaporkan perbedaan kuantitatif morfologi antar kultivar kopi Arabika berdasarkan adaptasi lokasi tanam.

Jumlah benang sari per bunga bervariasi antara 4 hingga 10, dengan nilai maksimum (10 benang sari) ditemukan pada aksesi dari Desa Nua Nea, dan jumlah minimum (4 benang sari) diamati pada beberapa aksesi dari Desa Kampung Baru, Sepa, Aira, Meu, Haya, Sakanussa, Salamahu, Tamilow, dan Nua Nea. Variasi kuantitatif dan morfologis pada organ bunga kopi merupakan indikator penting dalam evaluasi keragaman genetik dan potensi produktivitas suatu aksesi (Silva *et al.*, 2024; Suárez & Flórez Ramos, 2023). Selain itu, perbedaan dalam jumlah fasikula dan organ reproduktif juga berhubungan dengan daya hasil, efisiensi penyerbukan, dan adaptasi terhadap kondisi agroekologi setempat. Keberagaman tersebut menjadi dasar dalam seleksi tetua untuk pemuliaan berbasis morfologi bunga, yang bertujuan meningkatkan kualitas dan stabilitas hasil panen (López *et al.*, 2021).



Gambar 4. Proses pembentukan bunga dan buah kopi

Beberapa studi sebelumnya menyebutkan bahwa periode kering atau musim kemarau yang berlangsung selama 2–3 bulan diperlukan untuk memecah dormansi bakal bunga pada tanaman kopi. Fase dorman tersebut kemudian diakhiri dengan curah hujan awal musim yang cukup, yang berperan sebagai pemicu fisiologis pembungaan serempak. Dengan demikian, keberadaan musim kemarau ringan yang disusul hujan awal musim sangat krusial dalam menentukan sinkronisasi pembungaan dan pada akhirnya produktivitas kopi yang optimal (Lima *et al.*, 2021; Ronchi & DaMatta, 2025). Penelitian-penelitian terbaru juga memperkuat temuan ini, menunjukkan bahwa stres air ringan selama fase vegetatif akhir dapat menginduksi pembentukan primordia bunga, sedangkan rehidrasi oleh hujan memicu aktivitas metabolik yang mengarah pada anthesis (Ronchi & DaMatta, 2025).

Fluktuasi antara kelembaban rendah dan tinggi sangat berpengaruh terhadap aktivasi gen-gen pengatur pembungaan serta percepatan fase reproduktif (Azevedo *et al.*, 2025). Oleh karena itu, perubahan pola iklim yang menyebabkan kemarau ekstrem atau hujan tak menentu dapat berdampak negatif terhadap dinamika pembungaan dan hasil panen kopi (Unigarro *et al.*, 2023).

Struktur Bunga Kopi

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa karakter morfologi bunga kopi pada masing-masing aksesori memperlihatkan variasi yang cukup signifikan, baik dalam struktur maupun ukuran organ generatifnya. Tangkai bunga menunjukkan perbedaan panjang antar aksesori, dengan nilai maksimum sebesar 0,9 mm yang ditemukan pada aksesori dari Desa Haya, Sakanussa, dan Nua Nea, serta panjang minimum 0,3 mm yang tercatat pada aksesori dari Desa Hollo. Demikian pula, panjang tabung mahkota bunga memperlihatkan rentang yang luas, yakni dari 1 cm (aksesori Desa Kampung Baru, Sepa, Aira, Meu, Salamahu, dan Nua Nea) hingga 3,2 cm (aksesori Desa Hollo).

Variasi ini sejalan dengan studi terbaru yang melaporkan bahwa panjang tabung mahkota, lobus stigma, dan jumlah benang sari sangat bervariasi antar genotipe *Coffea* spp., dan memengaruhi efisiensi penyerbukan dan pembentukan buah (C. A. da Silva *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2024). Bunga kopi umumnya tumbuh di ketiak daun (axillary), membentuk bunga majemuk aksilar, dan tidak ditemukan perbungaan pada batang tua. Posisi ini bersifat khas dan menjadi indikator perkembangan generatif tanaman kopi. Struktur bunga, khususnya tabung mahkota dan jumlah benang sari, memengaruhi efisiensi penyerbukan dan pembuahan, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap daya hasil kopi (Das *et al.*, 2025; Geeraert, 2019). Dengan demikian, pemahaman terhadap keragaman morfologi bunga sangat penting tidak hanya sebagai alat identifikasi dan klasifikasi aksesori, tetapi juga sebagai informasi dasar untuk pengelolaan agronomi dan strategi pemuliaan varietas unggul, khususnya dalam menghadapi tantangan perubahan iklim global dan kebutuhan peningkatan produktivitas secara berkelanjutan.

Morfologi Buah

Karakterisasi morfologi memiliki peran penting dalam konservasi plasma nutfah, karena memungkinkan penyusunan informasi berkelanjutan mengenai keragaman genetik tanaman kopi (Chidoko *et al.*, 2022; Ndikumana, 2022). Karakter morfologi yang diamati dalam penelitian ini bersifat fenotipik, heritable, dapat diidentifikasi secara visual, dan terekspresi secara stabil dalam berbagai kondisi lingkungan (Alberto *et al.*, 2024). Evaluasi morfologi buah merupakan indikator penting untuk menilai keanekaragaman agronomis dan potensi produksi pada tanaman kopi lokal (Geeraert, 2019). Hasil pengamatan menunjukkan adanya variasi ukuran buah, yaitu antara buah kopi berbiji kecil dan berbiji besar. Buah berbiji kecil ditemukan pada aksesori dari Desa Sepa, Hollo, Haya, Meu, Aira, Nua Nea, dan Kampung Baru, sedangkan buah berbiji besar diamati pada aksesori dari Desa Kampung Baru, Sepa, Meu, Haya, Sakanussa, Tamilow, dan Salamahu.

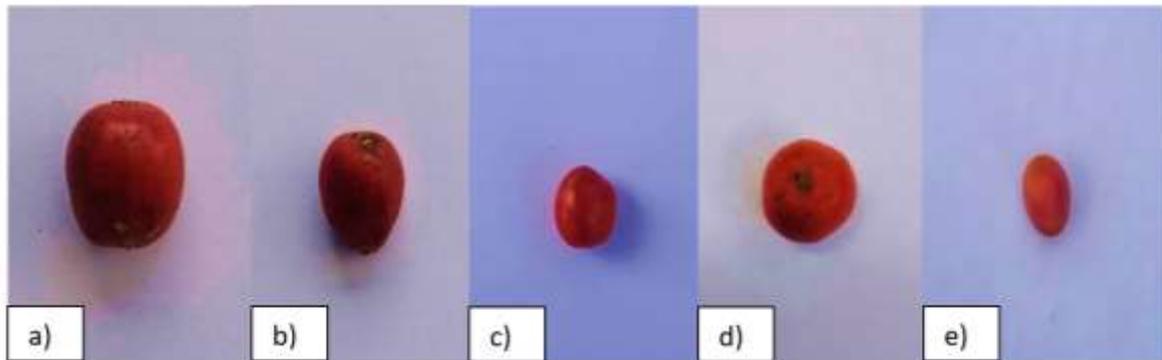
Tanaman kopi mulai berbuah pada umur 1–4 tahun, dengan frekuensi berbuah 2–3 kali per tahun, terutama pada bulan Juni–Juli, Oktober–November, November–Desember, dan Desember–Januari. Pola ini menggambarkan bahwa frekuensi dan waktu berbuah *Coffea arabica* sangat dipengaruhi oleh kondisi agroforestri dan perlakuan pemupukan. Selain itu suhu malam yang hangat dapat mempercepat proses pematangan buah, sementara variabilitas suhu siang hari memengaruhi inisiasi pembungaan dan perkembangan buah.

Berdasarkan hasil pengukuran, panjang buah maksimum tercatat sebesar 1,9 cm pada aksesori dari Desa Kampung Baru, Salamahu, dan Tamilow, sedangkan panjang minimum sebesar 0,9 cm diamati di Desa Kampung Baru. Lebar buah tertinggi (1,7 cm) ditemukan pada aksesori dari Desa Tamilow, Sakanussa, dan Kampung Baru, sedangkan lebar terendah (0,7 cm) ditemukan pada aksesori dari Desa Aira, Hollo, dan Kampung Baru, yang konsisten dengan studi Gebreselassie *et al.* (2024) mengenai keragaman ukuran buah pada genotipe Arabika di Etiopia sebagai cerminan variasi genetik dan adaptasi lokal terhadap agroekosistem.

Buah dengan bobot terbesar (2 gram) tercatat pada aksesori dari Salamahu, Aira, Tamilow, Sakanussa, dan Kampung Baru, sedangkan bobot terendah (0,8 gram) ditemukan pada aksesori dari Hollo, Sepa, Haya, dan Meu. Selain itu, diameter buah juga menunjukkan keragaman signifikan: terbesar 5 cm (Desa Sepa dan Kampung Baru) dan terkecil 2,5 cm (Desa Hollo dan Sakanussa). Variasi ini konsisten dengan hasil penelitian oleh (Degefa *et al.*, 2021) dan (Ndikumana, 2022) yang menunjukkan bahwa keragaman ukuran buah kopi mencerminkan variasi genetik dan interaksinya dengan faktor lingkungan seperti ketinggian dan kelembaban tanah. Panjang tangkai buah bervariasi antara 0,2–1 cm, di mana nilai maksimum ditemukan pada aksesori dari Kampung Baru, Sepa, Aira, Haya, Meu, Tamilow, Nua Nea, dan Salamahu,

sedangkan minimum (0,2 cm) tercatat di Hollo.Jarak buah dalam satu dompolan juga bervariasi, dari 25,1 cm (maksimum, Desa Sepa) hingga 4 cm (minimum, Kampung Baru).

Warna buah berubah seiring tingkat kematangan, yang menjadi indikator visual terhadap kematangan fisiologis benih. Benih yang dipetik sebelum mencapai kematangan penuh cenderung belum memiliki cadangan makanan optimal dan embrio belum berkembang sempurna (Costa *et al.*, 2021). Variasi dalam morfologi buah, terutama ukuran dan warna, juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu, dan kelembaban, yang memengaruhi ekspresi fenotipik tanaman dalam merespons tekanan lingkungan (Alberto *et al.*, 2024). Pemahaman terhadap keragaman morfologi buah tidak hanya mendukung konservasi genetik, tetapi juga merupakan dasar penting dalam seleksi varietas unggul, perakitan kultivar baru, serta strategi adaptasi terhadap perubahan iklim dan pengelolaan agronomi di masa depan.



Gambar 5. Bentuk buah kopi ; a). agak bundar, b). bulat telur terbalik, c). bulat telur, d). elips, e). memanjang.

Variasi Bentuk Buah Kopi

Berdasarkan deskriptor morfologi buah yang digunakan dalam penelitian ini, bentuk buah kopi menunjukkan empat tipe utama, yaitu: bulat, *obovate*, bulat telur (*ovate*), dan eliptik. Keberagaman bentuk ini mencerminkan ekspresi fenotipik yang dapat dipengaruhi oleh faktor genetik maupun lingkungan, dan menjadi karakter penting dalam proses identifikasi, klasifikasi, serta seleksi aksesori kopi lokal. Temuan ini konsisten dengan laporan Gebreselassie *et al.* (2024) yang menegaskan bahwa variasi morfologi buah kopi Arabika di Ethiopia, termasuk bentuk dan ukuran, merupakan indikator penting dalam pemetaan keragaman genetik. Penelitian oleh Alberto *et al.* (2024) juga menunjukkan bahwa bentuk buah kopi, dari bulat hingga eliptik, dapat berasosiasi dengan adaptasi ketinggian dan tekanan lingkungan mikro di wilayah tropis.

Bentuk buah bulat ditemukan pada aksesori dari SL 01, 02, 03 (Desa Salamahu), TM 01–04 (Desa Tamilow), SK 01–05 (Desa Sakanussa), HY 01–03 (Desa Haya), ME 01–03 (Desa Meu), SP 01 dan 03 (Desa Sepa), serta KB 01 (Desa Kampung Baru). Bentuk ini biasanya dikaitkan dengan spesies *Coffea canephora* (kopiRobusta), yang memiliki buah lebih kompak dan berdaging tebal. Keberagaman bentuk buah ini mencerminkan potensi keragaman genetik antar aksesori, yang penting dalam mendukung program pemuliaan, konservasi plasma nutfah, dan pengembangan varietas unggul yang adaptif terhadap kondisi agroekologi spesifik (Chidoko *et al.*, 2022).

Pengelompokan Aksesori Kopi Asal Seram Selatan Berdasarkan Karakter Morfologi

Analisis dendrogram aksesori kopi arabika berdasarkan karakter morfologi

Dendrogram yang disajikan pada Gambar 6 menunjukkan hasil Hierarchical Cluster Analysis (HCA) terhadap 16 aksesori kopi Arabika berdasarkan karakter morfologi. Analisis dilakukan menggunakan metode complete linkage dan jarak Euclidean sebagai ukuran kemiripan. Hasil pengelompokan menunjukkan bahwa aksesori-aksesori tersebut terbagi ke dalam empat klaster utama, yang mencerminkan tingkat keragaman morfologi antar aksesori yang cukup tinggi di wilayah penelitian. HCA merupakan metode yang umum digunakan dalam studi pemuliaan tanaman karena mampu mengevaluasi hubungan kekerabatan morfologis dan keragaman genetik secara efektif, sebagaimana telah digunakan dalam analisis klaster kopi Arabika di Peru oleh Paredes-Espinosa *et al.* (2023), di mana 162 aksesori diklasifikasikan ke dalam lima kelompok berdasarkan 19 karakter morfologis utama. Pendekatan serupa juga diterapkan oleh Ndikumana (2022) dalam karakterisasi kopi Arabika di Burundi dan Degefa *et al.* (2021), yang menekankan keandalan HCA dalam mengungkap struktur genetik dan fenotipik populasi kopi lokal yang kompleks.

Klaster I: Kemiripan Morfologi Tinggi antar Aksesori KB 04, NN 05, dan HY 05. Aksesori dalam Klaster I, yaitu KB 04, NN 05, dan HY 05, menunjukkan tingkat kemiripan morfologi sebesar 31,23%. Ketiganya memiliki kesamaan dalam penampilan keseluruhan, ketebalan lilin pada tunas, perkembangan vegetatif, dan bentuk buah. Perbedaan utama antara aksesori tersebut terletak pada bentuk tajuk, kebiasaan bercabang, sudut penyisipan cabang primer, warna dan bentuk daun, serta bentuk dan warna ujung buah. Perbedaan yang paling mencolok teramati pada aksesori HY 05, khususnya pada aspek perkembangan vegetatif dibandingkan dua aksesori lainnya. Variasi ini mengindikasikan adanya interaksi genotipe ×

lingkungan (G×E) yang membentuk ekspresi fenotipik masing-masing individu, sebagaimana ditegaskan oleh Weldemichael Abrha *et al.* (2022) yang menunjukkan bahwa variabilitas fenotipik pada kopi Arabika di Ethiopia sangat dipengaruhi oleh stabilitas genotipe di berbagai lingkungan tumbuh. Temuan ini diperkuat oleh Ndikumana (2022), yang menyatakan bahwa meskipun ada kesamaan morfologi antaraksesi, variasi fenotipik yang teramati menunjukkan adanya kombinasi antara warisan genetik dan adaptasi lokal terhadap agroklimat. Dengan demikian, kemiripan morfologi dalam klaster ini kemungkinan besar bukan hanya hasil dari kesamaan genetik, melainkan juga respons adaptif terhadap kondisi agroekologi yang serupa.

Klaster II: Hubungan Morfologi Dekat antara AR 02 dan SK 03. Aksesori AR 02 dan SK 03, yang memiliki tingkat kemiripan morfologi tertinggi dalam dendrogram, yaitu 38,30%. Kesamaan teridentifikasi pada bentuk tajuk, perkembangan vegetatif, bentuk dan warna daun, bentuk ujung daun, ketebalan lilin tunas, serta bentuk ujung buah. Meskipun demikian, keduanya memiliki perbedaan pada penampilan keseluruhan, kebiasaan bercabang, sudut penyisipan cabang primer, warna dan bentuk buah, serta ketebalan daging buah (pulp). Tingginya kemiripan ini bisa menunjukkan kedekatan genetik atau respons adaptif serupa terhadap lingkungan tumbuh lokal, sebagaimana ditemukan dalam studi Gebreselassie *et al.* (2024), yang menunjukkan bahwa aksesori Arabika dari lingkungan agroekologi serupa cenderung mengelompok bersama meskipun berasal dari populasi genetik yang berbeda. Hal ini juga diperkuat oleh Paredes-Espinosa *et al.* (2023), yang melaporkan bahwa klaster morfologi pada kopi Peru mencerminkan baik hubungan genetik maupun pengaruh adaptasi mikroklimat.

Klaster III: Kelompok Paling Heterogen. Ini mencakup aksesori KB 05, HL 03, SP 03, SK 01, AR 01, NN 01, dan NN 02. Kelompok ini menggambarkan keragaman fenotipik yang substansial, yang mungkin disebabkan oleh perbedaan genetik dan adaptasi mikroklimat. Temuan ini sejalan dengan laporan Alemayehu *et al.* (2022), yang mencatat bahwa kelompok-kelompok kopi lokal yang terbentuk melalui HCA cenderung memperlihatkan perbedaan ekstrem akibat interaksi genotipe-lingkungan dan efek topografi lokal. Selain itu, Degefa *et al.* (2021) menegaskan bahwa subklaster dengan keragaman tinggi pada kopi Arabika Ethiopia mencerminkan kehadiran keragaman genetik laten yang dapat dimanfaatkan untuk seleksi aksesori unggul.

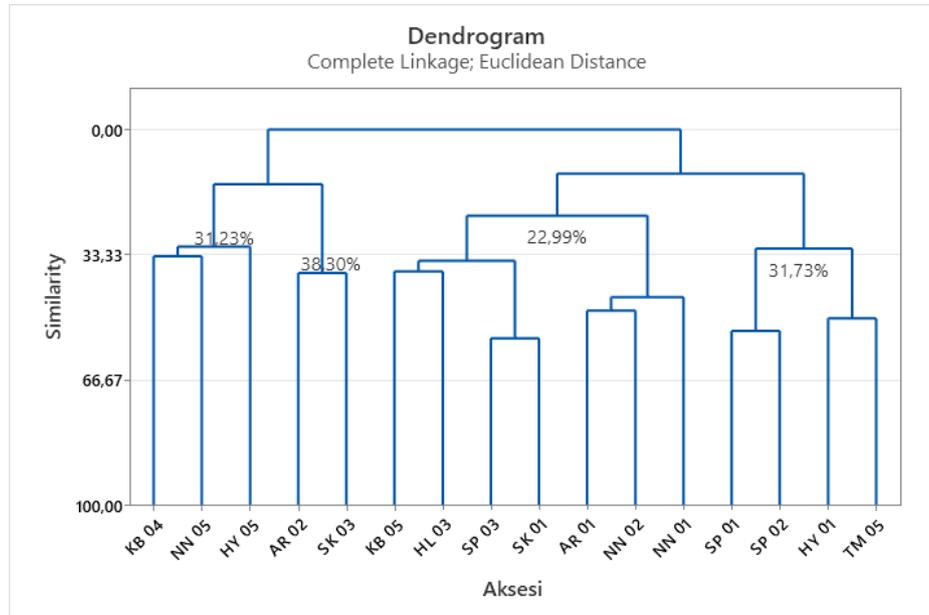
Subkelompok pertama terdiri dari KB 05 dan HL 03, yang memiliki kesamaan dalam penampilan keseluruhan, bentuk ujung daun, warna dan bentuk daun, ketebalan lilin tunas, serta ketebalan pulp. Perbedaan antar keduanya mencakup bentuk tajuk, kebiasaan percabangan, sudut penyisipan cabang primer, perkembangan vegetatif, serta bentuk dan warna buah.

Subkelompok kedua terdiri atas SP 03 dan SK 01, yang serupa dalam penampilan keseluruhan, bentuk tajuk, percabangan, sudut penyisipan cabang primer, bentuk ujung daun, warna daun, ketebalan lilin tunas, bentuk buah, dan ketebalan pulp. Namun demikian, mereka berbeda pada perkembangan vegetatif, bentuk daun, warna buah, dan bentuk ujung buah. Aksesori AR 01, NN 01, dan NN 02 menunjukkan kemiripan pada penampilan keseluruhan, kebiasaan percabangan, perkembangan vegetatif, bentuk ujung daun, bentuk daun, ketebalan lilin tunas, serta bentuk dan ujung buah. Faktor pembeda di antara ketiganya mencakup bentuk tajuk, sudut penyisipan cabang primer, warna daun, warna buah, dan ketebalan pulp. Perbedaan paling mencolok terlihat antara NN 01 dibandingkan dengan AR 01 dan NN 02, terutama pada karakter warna buah, yang mencerminkan respons fenotipik terhadap tekanan lingkungan spesifik dan seleksi lokal.

Klaster IV: Aksesori dari Lokasi Geografis Berbeda dengan Kemiripan Fenotipik Sedang. Ini terdiri atas dua pasangan aksesori. Pasangan pertama adalah SP 01 dan SP 02, yang memiliki kesamaan dalam penampilan keseluruhan, bentuk tajuk, kebiasaan percabangan, sudut cabang primer, perkembangan vegetatif, warna daun, ketebalan lilin tunas, warna buah, bentuk ujung buah, dan ketebalan pulp. Namun, perbedaan antara keduanya terlihat pada bentuk ujung daun, bentuk daun, dan bentuk buah.

Pasangan kedua dalam klaster ini adalah HY 01 dan TM 05. Keduanya memiliki kemiripan dalam kebiasaan bercabang, bentuk tajuk, sudut penyisipan cabang primer, perkembangan vegetatif, warna buah, bentuk ujung buah, dan ketebalan pulp. Perbedaan utama antara keduanya terletak pada penampilan keseluruhan, bentuk ujung dan warna daun, bentuk daun, ketebalan lilin tunas, serta bentuk buah.

Tingkat kemiripan keseluruhan pada klaster ini tercatat sebesar 31,73%, mengindikasikan bahwa kesamaan morfologi dapat terjadi meskipun aksesori berasal dari lokasi geografis yang berbeda, dan hal ini dapat dijelaskan oleh seleksi lokal atau adaptasi paralel, sebagaimana dijelaskan oleh Khemira *et al.* (2024), yang menunjukkan bahwa beberapa kelompok kopi Arabika di Arab Saudi membentuk klaster fenotipik serupa meski berasal dari wilayah berbeda karena tekanan ekologi yang mirip. Temuan ini juga diperkuat oleh Alemayehu *et al.* (2022), yang melaporkan bahwa klaster morfologi kopi lokal Amaro mencerminkan keragaman genetik yang tidak selalu sejalan dengan asal geografis, melainkan hasil seleksi agronomis lokal. Secara keseluruhan, analisis dendrogram ini mengonfirmasi bahwa keragaman morfologi kopi Arabika lokal cukup tinggi dan dapat menjadi dasar dalam identifikasi tetua unggul, strategi konservasi genetik, serta pengembangan varietas yang adaptif terhadap kondisi agroekologi Seram Bagian Selatan.



Gambar 6. Dendrogram dari hasil analisis cluster morfologi aksesori-aksesori kopi Arabika pada lokasi-lokasi penelitian.

Hasil analisis kluster menunjukkan bahwa keragaman morfologi antar aksesori kopi Arabika di wilayah Seram Bagian Selatan tergolong tinggi, dengan tingkat kemiripan berkisar antara 22,99% hingga 38,30%. Temuan ini mengindikasikan bahwa sebagian besar aksesori menunjukkan perbedaan karakter fenotipik yang signifikan, yang sangat potensial untuk dimanfaatkan dalam program pemuliaan tanaman, khususnya dalam seleksi tetua, serta konservasi sumber daya genetik. Hasil ini sejalan dengan studi Gebreselassie *et al.* (2024) yang menunjukkan bahwa keragaman morfologi pada aksesori kopi Arabika di Ethiopia berkorelasi dengan potensi adaptasi lokal dan penting untuk strategi pemuliaan varietas. Perbedaan pola pengelompokan yang teridentifikasi juga mencerminkan adanya pengaruh kondisi lingkungan, mengingat karakter morfologi tanaman kopi diketahui sangat responsif terhadap variasi agroekologi lokal seperti ketinggian, suhu, curah hujan, dan jenis tanah (Alemayehu *et al.*, 2022).

Hierarchical Cluster Analysis (HCA) terbukti mampu mengelompokkan aksesori berdasarkan karakter penciri morfologi, seperti bentuk daun, tajuk, warna buah, dan ketebalan pulp, sebagaimana telah digunakan secara luas dalam evaluasi genetik tanaman tahunan (Paredes-Espinosa *et al.*, 2023). Sebagaimana dikemukakan, semakin kecil jarak genetik antar aksesori maka semakin besar kesamaan morfologinya, sedangkan jarak yang besar mengindikasikan kekerabatan yang lebih jauh. Oleh karena itu, pola kluster yang terbentuk dalam penelitian ini dapat dijadikan dasar awal dalam mengidentifikasi varietas lokal unggul, serta menyeleksi tetua potensial dalam program pemuliaan kopi Arabika yang sesuai dengan kondisi agroekologi spesifik di wilayah Seram Bagian Selatan.

Analisis dendrogram aksesori kopi robusta berdasarkan karakter morfologi

Dendrogram yang ditampilkan pada Gambar 7 menunjukkan hasil *Hierarchical Cluster Analysis (HCA)* terhadap 29 aksesori kopi Robusta berdasarkan karakter morfologi. Analisis dilakukan menggunakan metode *complete linkage* dengan jarak Euclidean sebagai ukuran kedekatan. Hasil analisis menunjukkan tiga kluster utama yang mencerminkan tingkat kemiripan morfologi yang bervariasi antar aksesori, yang mengindikasikan adanya keragaman fenotipik yang signifikan di antara tanaman kopi yang diamati di wilayah penelitian. Hasil ini mengungkapkan bahwa analisis kluster pada kopi Robusta berhasil memisahkan aksesori-aksesori ke dalam beberapa kelompok berdasarkan perbedaan morfologi. Selain itu, menunjukkan juga bahwa keragaman fenotipik dalam karakter seperti tinggi tanaman, bentuk buah, dan ukuran daun sangat relevan dalam strategi pemuliaan dan pelestarian genetik kopi Robusta.

Kluster I: Kesamaan Tajuk dan Struktur Buah. Kluster ini mencakup aksesori KB 01, TM 01, SL 03, SP 03, dan ME 01, yang menunjukkan tingkat kemiripan sebesar 28,88%. Aksesori-aksesori ini memiliki kesamaan morfologi pada karakter kebiasaan percabangan, perkembangan vegetatif, warna daun, ketebalan lilin tunas, bentuk buah, dan ketebalan daging buah (pulp). Meski berada dalam kelompok yang sama, terdapat perbedaan yang nyata, terutama pada penampilan keseluruhan, bentuk tajuk, sudut penyisipan cabang primer, bentuk ujung daun, bentuk daun, bentuk ujung buah, dan warna buah. Perbedaan paling signifikan teridentifikasi pada KB 01 dibandingkan TM 01 dan SL 03, khususnya pada bentuk tajuk dan morfologi daun.

Aksesori lainnya dalam kluster ini yakni SP 04, ME 05, dan TM 02, menunjukkan kesamaan pada bentuk tajuk, percabangan, warna daun, ketebalan lilin tunas, dan warna buah, tetapi berbeda pada penampilan keseluruhan, sudut cabang primer, bentuk dan ujung daun, bentuk buah, serta ketebalan pulp. Hasil ini menunjukkan bahwa keragaman fenotipik yang tinggi dapat dideteksi melalui pengelompokan kluster morfologi yang sensitif terhadap perbedaan cabang,

warna daun, dan ukuran buah. Perbedaan pada struktur daun dan lilin stomatal menunjukkan respons terhadap tekanan lingkungan mikro dan faktor genetik, yang dapat membentuk klaster morfologi meskipun dengan nilai kemiripan sedang. Dengan demikian, pola variasi ini mencerminkan kemungkinan pengaruh gabungan antara genetik dan adaptasi terhadap lingkungan mikro setempat.

Klaster II merupakan kelompok paling besar dan heterogen. Ini mencakup aksesori dari berbagai desa seperti TM 03, KB 03, ME 02, SK 01–03, HY 01–04, ME 04, SL 01–02, dan SL 04, dengan tingkat kemiripan berkisar 5,39%–26,72%. Variasi morfologi mencakup bentuk buah, warna daun, ketebalan pulp, perkembangan vegetatif, dan bentuk daun, menunjukkan bahwa pengaruh lingkungan terhadap ekspresi karakter sangat besar. Aksesori KB 02 dan KB 03 memiliki kesamaan pada penampilan keseluruhan, bentuk dan warna daun, ketebalan lilin tunas, warna dan bentuk buah, serta bentuk ujung buah. Namun, perbedaan antara keduanya mencakup bentuk tajuk, kebiasaan percabangan, sudut penyisipan cabang primer, bentuk ujung daun, perkembangan vegetatif, dan ketebalan pulp.

Demikian pula, aksesori TM 03 dan TM 05 menunjukkan kesamaan pada penampilan keseluruhan, sudut penyisipan cabang primer, perkembangan vegetatif, warna daun, ketebalan lilin tunas, warna buah, bentuk ujung buah, dan ketebalan pulp. Namun, perbedaan terletak pada bentuk tajuk, kebiasaan bercabang, bentuk ujung daun, bentuk daun, dan bentuk buah. Aksesori ME 04 serta HY 02 dan HY 03 juga menunjukkan kemiripan dalam penampilan keseluruhan, perkembangan vegetatif, warna daun, warna buah, dan bentuk ujung buah. Sementara itu, perbedaan di antara ketiganya mencakup bentuk tajuk, kebiasaan bercabang, sudut penyisipan cabang primer, bentuk ujung daun, ketebalan lilin tunas, dan ketebalan pulp.

Aksesori SK 04, SK 05, dan SL 02 memiliki kesamaan pada penampilan keseluruhan, kebiasaan bercabang, perkembangan vegetatif, bentuk ujung daun, warna dan bentuk daun, bentuk buah, serta ketebalan pulp. Namun, mereka berbeda pada bentuk tajuk, sudut penyisipan cabang primer, ketebalan lilin tunas, warna buah, dan bentuk ujung buah. Perbedaan paling mencolok ditemukan antara SK 05 dengan SL 02 dan SK 04. Sementara itu, aksesori HY 04, HL 02, dan NN 04 menunjukkan kesamaan dalam penampilan keseluruhan, kebiasaan bercabang, sudut penyisipan cabang primer, bentuk ujung daun, warna daun, ketebalan lilin tunas, bentuk ujung buah, dan ketebalan pulp. Namun, perbedaan di antara ketiganya terdapat pada bentuk tajuk, perkembangan vegetatif, bentuk daun, warna buah, dan bentuk buah. Perbedaan paling nyata terletak pada HY 04 dibandingkan HL 02 dan NN 04.

Klaster II mencerminkan kompleksitas hubungan morfologis yang mencerminkan variasi genetik serta pengaruh lingkungan terhadap ekspresi karakter tanaman. Dari hasil penelitian ini dapat dijelaskan bahwa variabilitas fenotipik pada kopi sangat dipengaruhi oleh komponen lingkungan dan genetik secara simultan. Hal ini juga diperkuat oleh (Kiwuka *et al.*, 2023), yang melabpporkan bahwa perbedaan karakter morfologi dan pertumbuhan antar populasi kopi Robusta mencerminkan adaptasi terhadap kondisi iklim lokal yang spesifik. Karakter morfologi tetap menjadi acuan penting untuk pengelompokan dan seleksi aksesori dalam program pemuliaan dan konservasi, seperti disarankan oleh Dubberstein *et al.* (2021) melalui studi stomatal dan daun kopi.

Klaster III: Kemiripan Morfologi Paling Tinggi. Klaster ini terdiri atas aksesori SL 05, SK 04, HL 01–03, NN 01–03, dan SP 05. Klaster ini menunjukkan tingkat kemiripan morfologi tertinggi, mencapai 39,59%, mengindikasikan bahwa aksesori-aksesori dalam kelompok ini memiliki karakter fenotipik yang sangat seragam. Kesamaan karakter utamanya meliputi struktur tajuk, bentuk daun, warna buah, dan bentuk percabangan. Kondisi ini kemungkinan mencerminkan kesamaan genetik atau adaptasi terhadap lingkungan tumbuh yang seragam (Campuzano-Duque & Blair, 2022).

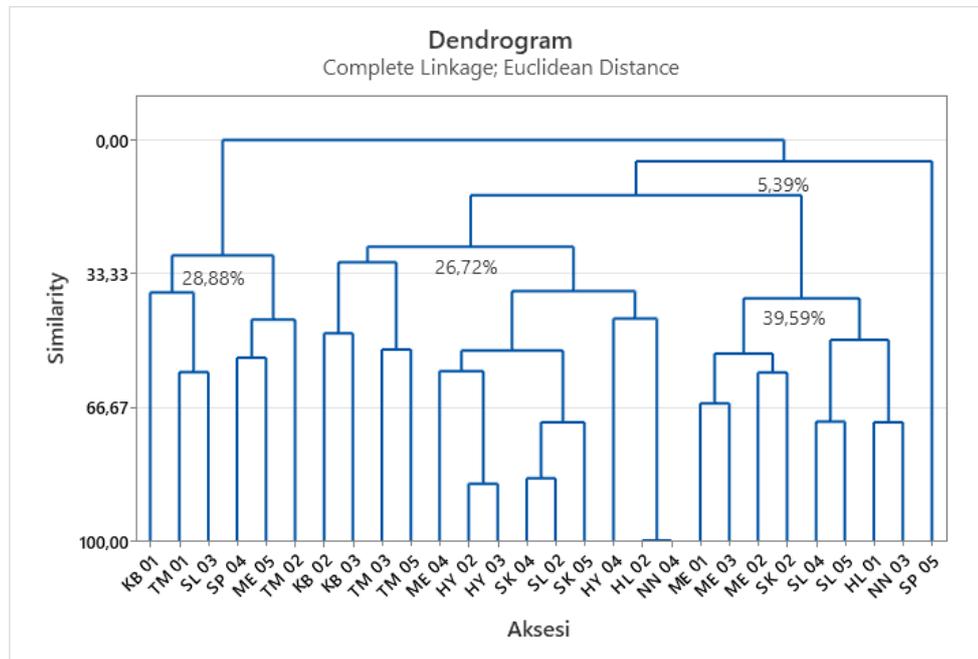
Beberapa aksesori menunjukkan kesamaan yang spesifik: ME 01 dan ME 03 memiliki kesamaan pada penampilan keseluruhan, bentuk tajuk, kebiasaan bercabang, sudut cabang primer, perkembangan vegetatif, bentuk dan warna daun, bentuk ujung buah, dan ketebalan pulp. Namun, berbeda dalam bentuk daun dan bentuk buah. Aksesori ME 02 dan SK 02 juga serupa, tetapi berbeda pada sudut penyisipan cabang primer, bentuk ujung daun, dan warna buah. Aksesori dalam klaster ini seperti ME 01 dan ME 03, ME 02 dan SK 02, maupun HL 03 dan NN 03, memperlihatkan pola kesamaan dan perbedaan yang khas berdasarkan deskriptor morfologi, menunjukkan nilai taksonomi penting untuk seleksi tetua dalam pemuliaan.

Aksesori SL 04 dan SL 05 memiliki kesamaan yang luas pada sebagian besar karakter morfologi, dengan perbedaan hanya pada bentuk tajuk dan warna buah. Aksesori HL 03 dan NN 03 menunjukkan pola yang mirip, tetapi memiliki perbedaan pada sudut penyisipan cabang primer dan ketebalan lilin tunas. Sementara itu, SP 05 tampil berbeda dibandingkan aksesori lainnya dan dapat dikategorikan sebagai outlier dalam klaster ini, mencerminkan tingkat keragaman yang lebih tinggi. Keseragaman yang diamati dalam klaster ini mendukung pendekatan seleksi tetua berbasis morfologi seperti yang dijelaskan oleh Amélia *et al.* (2021) bahwa kelompok kopi Robusta dengan kemiripan morfologi tinggi sering kali memiliki potensi daya hasil seragam dan respons fisiologis homogen terhadap lingkungan.

Implikasi dan Signifikansi Analisis Klaster.

Dendrogram pada Gambar 7 memberikan gambaran visual yang komprehensif terhadap relasi fenotipik antar aksesori berdasarkan kesamaan karakter morfologi. Hierarchical Cluster Analysis (HCA) terbukti efektif untuk klasifikasi kopi berdasarkan parameter morfologi, serta telah diakui secara luas dalam pemuliaan tanaman tahunan. Tingkat kemiripan antar aksesori yang berkisar antara 5,39% hingga 39,59% menandakan adanya keragaman genetik yang tinggi, yang dapat digunakan sebagai dasar dalam konservasi plasma nutfah dan pengembangan varietas kopi Robusta adaptif di Seram Bagian Selatan.

Hasil HCA menunjukkan bahwa aksesori kopi Robusta dari wilayah Seram Bagian Selatan memiliki keragaman morfologi yang tinggi, dengan nilai kemiripan berkisar antara 5,39% hingga 39,59%. Tingkat keragaman ini menjadi dasar penting dalam strategi konservasi plasma nutfah dan pemilihan aksesori unggul untuk pengembangan varietas adaptif terhadap kondisi agroekologi spesifik, sebagaimana dikemukakan pula oleh Paredes-Espinosa *et al.* (2023), yang menyatakan bahwa analisis kluster berbasis morfologi mendukung pendekatan berkelanjutan dalam pemuliaan tanaman tahunan. Temuan ini menunjukkan bahwa aksesori kopi di Seram Bagian Selatan memiliki keragaman morfologi yang sebanding dengan daerah pusat kopi lainnya di Indonesia, meskipun belum pernah diteliti secara ilmiah. Hal ini menunjukkan potensi eksplorasi lebih lanjut dalam program pemuliaan berbasis adaptasi agroekologi spesifik.



Gambar 7. Dendrogram dari hasil analisis cluster morfologi aksesori-aksesori kopi Robusta pada lokasi-lokasi penelitian.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan mengkarakterisasi 45 aksesori kopi lokal dari Seram Bagian Selatan, terdiri atas 16 aksesori Arabika dan 29 aksesori kopi Robusta, berdasarkan karakter morfologi pohon, daun, bunga, dan buah. Analisis kluster hierarkis mengungkap tingkat kemiripan morfologis antar aksesori yang bervariasi, mencerminkan keragaman genetik dan adaptasi terhadap agroekosistem lokal. Dendrogram HCA memberikan informasi fenotipik yang komprehensif dan berguna sebagai dasar ilmiah dalam konservasi sumber daya genetik serta seleksi tetua untuk pengembangan varietas kopi unggul yang adaptif di lokasi penelitian. Studi ini merupakan dokumentasi ilmiah pertama untuk wilayah ini dan memberikan kontribusi penting terhadap strategi pelestarian dan pemanfaatan genetik kopi guna mendukung keberlanjutan sistem produksi di Indonesia bagian timur.

DAFTAR PUSTAKA

- Alberto, N. J., Ferreira, A., Ribeiro-Barros, A. I., Aoyama, E. M., Silva, L. O. E., Rakocevic, M., Ramalho, J. C., & Partelli, F. L. (2024). Plant morphological and leaf anatomical traits in *Coffea arabica* L. cultivars cropped in Gorongosa Mountain, Mozambique. *Horticulturae*, *10*(9), 1002.
- Alemayehu, D., Garedeu, W., & Abebe, A. T. (2022). Phenotypic characterization of Amaro coffee (*Coffea arabica* L.) local accessions using multi-variate techniques at Awada, Southern Ethiopia. *Plant Genetic Resources*, *20*(1), 46–54.
- Amélia, M., Ferrão, G., Ferreira De Mendonça, R., Francisco, A., Fonseca, A., Ferrão, R. G., Felipe, J., Senra, B., Sérgio Volpi, P., Carlos, A., Filho, V., & Comério, M. (2021). Characterization and genetic diversity of *Coffea canephora* accessions in a germplasm bank in Espírito Santo, Brazil. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, *21*(2), 36132123. <https://doi.org/10.1590/1984-4029-2021-0000>
- Andini, R., Muzaifa, M., Marlina, L., Sulaiman, M. I., Jaya, R., Muslih, A. M., & Widayat, H. P. (2021). Making biodiversity work for coffee production. A case study of Gayo Arabica coffee in Indonesia. *MOJ Ecology and Environmental Science*, *6*(4), 156–162.
- Arimarsetiowati, R., Daryono, B. S., Astuti, Y. T. M., & Semiarti, E. (2023). Anatomical studies and evaluation of genetic stability in plantlets derived from somatic embryos of Arabica coffee. *HAYATI Journal of Biosciences*, *30*(3), 510–521. <https://doi.org/10.4308/hjb.30.3.510-521>

- Azevedo, L. M., de Oliveira, R. R., dos Reis, G. L., de Campos Rume, G., Alvarenga, J. P., Gutiérrez, R. M., de Carvalho Costa, J., & Chalfun-Junior, A. (2025). Hormonal crosstalk during the reproductive stage of *Coffea arabica*: interactions among gibberellin, abscisic acid, and ethylene. *Planta*, 261(5), 110. <https://doi.org/10.1007/s00425-025-04679-0>
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Maluku Tengah. (2023). Produksi dan luas areal tanaman perkebunan rakyat menurut jenis tanaman, 2021–2022.
- Beksisa, L. (2021). Genotype x environment interaction and its stability measures in plant breeding; major emphasis on arabica coffee (*Coffea arabica* L.): A Review. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, 8(3), 27–37.
- Breitler, J.-C., Etienne, H., Lérain, S., Marie, L., & Bertrand, B. (2022). Description of an Arabica coffee ideotype for agroforestry cropping systems: A guideline for breeding more resilient new varieties. *Plants*, 11(16), 2133.
- Chidoko, P., Mahoya, C., Tarusenga, S., & Kutuywayo, D. (2022). Genetic analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes in Zimbabwe Using Morphological Traits. *Plant Breeding and Biotechnology*, 10(4), 212–223.
- Clarence-Smith, W. G., & Topik, S. (2003). *The global coffee economy in Africa, Asia, and Latin America, 1500–1989*. Cambridge University Press.
- Costa, W. G. da, Barbosa, I. de P., de Souza, J. E., Cruz, C. D., Nascimento, M., & de Oliveira, A. C. B. (2021). Machine learning and statistics to qualify environments through multi-traits in *Coffea arabica*. *PLOS ONE*, 16(1), e0245298-. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245298>
- da Silva Angelo, P. C. (2024). Flowers are evoked to bring us delicious coffee. *Agricultural Sciences*, 15(7), 754–779.
- Das, M., Lalsangi, S., Santra, S., Khamaru, D., Singh, M., & Banerjee, R. (2025). Petals of Potency: Navigating the Bioactive Landscape of Coffee Flowers. In D. Lahiri, M. Nag, D. Bhattacharya, S. Pati, & T. Sarkar (Eds.), *Bioactive Ingredients for Healthcare Industry Volume 1: Extraction strategies, Stability and Medicinal Properties* (pp. 267–295). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3663-1_12
- Degefa, M., Alamerew, S., Mohammed, A., & Gemechu, A. (2021). Variability of coffee (*Coffea arabica* L.) germplasm collections based on morphological quantitative characters. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 10(4), 160–169.
- Dubberstein, D., Oliveira, M. G., Aoyama, E. M., Guilhen, J. H., Ferreira, A., Marques, I., Ramalho, J. C., & Partelli, F. L. (2021). Diversity of leaf stomatal traits among *Coffea canephora* pierre ex A. Froehner genotypes. *Agronomy*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy11061126>
- Dutra Giles, J. A., Ferreira, A. D., Partelli, F. L., Aoyama, E. M., Ramalho, J. C., Ferreira, A., & Falqueto, A. R. (2019). Divergence and genetic parameters between *Coffea* sp. genotypes based in foliar morpho-anatomical traits. *Scientia Horticulturae*, 245, 231–236. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.038>
- Gebreselassie, H., Tesfaye, B., & Gedebo, A. (2024). Genetic diversity of Arabica coffee genotypes in south Ethiopia using quantitative agro-morphological traits. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(7), 3485–3506.
- Geeraert, L. (2019). Intensification of Arabica Coffee Agroforestry Systems In Southwestern Ethiopia: Effects On Coffee Pollinator Communities and Coffee Quality. Arenberg Doctoral School Faculty of Science, KU Leuven.
- Getahun, T., Mamo, G., Haile, G., Markos, D., & Tesfaye, G. (2024). Beyond genetics× environment interaction on quality drivers of Arabica coffee: a review of implication for Gedeo indigenous agroforestry systems under changing climates. *Beverage Plant Research*, 4(1).
- Khemira, H., Mahdhi, M., Tounekti, T., Oteef, M. D. Y., Afzal, M., Alfaifi, Z., Sharma, M., Alsolami, W., & Shargi, D. (2024). Diversity among *Coffea arabica* populations in southwestern Saudi Arabia as revealed by their morphometric features. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52(1). <https://doi.org/10.15835/nbha52113452>
- Kiwuka, C., Vos, J., Douma, J. C., Musoli, P., Mulumba, J. W., Poncet, V., & Anten, N. P. R. (2023). Intraspecific variation in growth response to drought stress across geographic locations and genetic groups in *Coffea canephora*. *Ecology and Evolution*, 13(1), e9715. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ece3.9715>
- Krishnan, S., Matsumoto, T., Nagai, C., Falconer, J., Shriner, S., Long, J., Medrano, J. F., & Vega, F. E. (2021). Vulnerability of coffee (*Coffea* spp.) genetic resources in the United States. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68(7), 2691–2710.
- Lima, A. A., Santos, I. S., Torres, M. E. L., Cardon, C. H., Caldeira, C. F., Lima, R. R., Davies, W. J., Dodd, I. C., & Chalfun-Junior, A. (2021). Drought and re-watering modify ethylene production and sensitivity, and are associated with coffee anthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 181, 104289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104289>
- López, M. E., Santos, I. S., de Oliveira, R. R., Lima, A. A., Cardon, C. H., & Chalfun-Junior, A. (2021). An overview of the endogenous and environmental factors related to the *Coffea arabica* flowering process. *Beverage Plant Research*, 1(1), 1–16.
- Maghuly, F., Jankowicz-Cieslak, J., & Bado, S. (2020). Improving coffee species for pathogen resistance. *CABI Reviews*, 2020.
- Mishra, M. K., Dandamudi, P., Nayani, S. P., Munikoti, S. S., & Chelukunda, S. S. (2011). Variability in stomatal features and leaf venation pattern in Indian coffee (*Coffea arabica* L.) cultivars and their functional significance. *Botanica Serbica*, 35(2).
- Nadaf, S. A., Shivaprasad, P., Babou, C., Hariyappa, N., Chandrashekar, N., Kumari, P., Sowmya, P. R., Hareesh, S. B., Pati, N. R., & Nagaraja, J. S. (2024). Coffee (*Coffea* spp.). In *Soil Health Management for Plantation Crops: Recent Advances and New Paradigms* (pp. 337–389). Springer.
- Ndikumana, J. (2022). Agro-morphological characterization of Arabica coffee cultivars In Burundi. *International Journal of Plant Breeding and Genetics* 15(1), 14-23. DOI: 10.3923/ijpb.2021.14.23
- Ngure, G. M., & Watanabe, K. N. (2024). Coffee sustainability: leveraging collaborative breeding for variety improvement. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1431849.
- Paredes-Espinosa, R., Gutiérrez-Reynoso, D. L., Atoche-Garay, D., Mansilla-Córdova, P. J., Abad-Romaní, Y., Girón-Aguilar, C., Flores-Torres, I., Montañez-Artica, A. G., Arbizu, C. I., Guerra, C. A. A., Quintana, J. L. M., Poemape, C., & Guerrero-Abad, J. C. (2023). Agro-morphological characterization and diversity analysis of *Coffea arabica* germplasm collection from INIA, Peru. *Crop Science*, 63(5), 2877–2893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/csc2.20971>
- Ronchi, C. P., & DaMatta, F. M. (2025). Chapter Thirteen - Managing the coffee crop for flowering synchronisation and fruit maturation: Agronomic and physiological issues. In F. M. Damatta & J. C. Ramalho (Eds.), *Advances in Botanical Research* (Vol. 114, pp. 421–454). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.abr.2024.03.001>

- Sauvadet, M., Dickinson, A. K., Somarriba, E., Phillips-Mora, W., Cerda, R. H., Martin, A. R., & Isaac, M. E. (2021). Genotype–environment interactions shape leaf functional traits of cacao in agroforests. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(2), 31. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00690-3>
- Silva, C. A. da, Partelli, F. L., Aoyama, E. M., Bonomo, R., Vieira, H. D., Ramalho, J. C., & Ribeiro-Barros, A. I. (2021). Floral morphology of Robusta coffee genotypes. *Agronomy Journal*, 113(4), 3080–3088. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/agj2.20743>
- Silva, L. O. E., Almeida, R. N. de, Feitoza, R. B. B., Da Cunha, M., & Partelli, F. L. (2025). Modifications in leaf anatomical traits of *Coffea* spp. genotypes induced by management× season interactions. *Plants*, 14(5), 828.
- Silva, L. O. E., Rodrigues, M. J. L., Ferreira, M. F. da S., de Almeida, R. N., Ramalho, J. C., Rakocevic, M., & Partelli, F. L. (2024). Modifications in floral morphology of *Coffea* spp. genotypes at two distinct elevations. *Flora*, 310, 152443. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152443>
- Sitompul, A. F., Dahelmi, D., & Roesma, D. I. (2025). Genetic Population of *Hypothenemus hampei* Ferarri (Coleoptera: Scolytinae) from Coffee (*Coffea* spp.) in Sumatra, Indonesia Using The Cytochrome Oxidase Subunit I Gene. *HAYATI Journal of Biosciences*, 32(2), 472–483.
- Suárez, J. C. A., & Flórez Ramos, C. P. (2023). Identification of sources of male sterility in the Colombian Coffee Collection for the genetic improvement of *Coffea arabica* L. *PLOS ONE*, 18(9), e0291264-. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291264>
- Sultana, F., Dev, W., Zhang, Z., Wang, Y., Chen, J., Wang, J., Khan, H., Tajo, S. M., & Li, Y. (2023). The consequences of plant architecture and spatial distribution of light interception on cotton growth and yield. *International Journal of Agriculture and Biosciences* 12(3), 153-158. <https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2023.058>.
- Tampubolon, J., Ginting, A., Nainggolan, H. L., & Tarigan, J. R. (2023). Indonesian coffee development path: production and international trade. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 41(12), 316–328.
- Unigarro, C. A., Imbachi, L. C., Darghan, A. E., & Flórez-Ramos, C. P. (2023). Quantification and qualification of floral patterns of *Coffea arabica* L. in Colombia. *Plants*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/plants12183332>
- Urgo, M. M., Tola, Y. B., Kebede, B. T., & Ogah, O. (2024). Insight into the effects of environmental variables on the physicochemical characteristics and biochemical composition of green Arabica coffee. *Beverage Plant Research*, 4. <https://doi.org/10.48130/bpr-0024-0021>
- Weldemichael Abrha, G., Kebede, S. A., Bedada, L. T., Berecha Yadessa, G., & Adugna Gutu, A. (2022). Genotype by environment interaction and yield stability of coffee (*Coffea arabica* L.) Genotypes Evaluated in Western Ethiopia. *Plant Production Science*, 25(4), 467–483. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2022.2136722>