

Leaf Morphology and Functional Traits of Four Mangrove Seedling Species Under Nursery Conditions

Lefdi Agung Nugraha^{1,2*}, Pebriandi^{1,2}, Viny Volcherina Darlis¹, M. Mardhiansyah¹, Ewi Irfani¹

¹Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia;

²Center for Peatland and Disaster Studies (CPDS), Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia;

Article History

Received : March 28th, 2026

Revised : July 10th, 2026

Accepted : July 14th, 2026

*Corresponding Author: **Lefdi Agung Nugraha**, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia;
Email: lefdi.agung@lecturer.unri.ac.id

Abstract: Mangrove species exhibit variations in leaf functional traits that reflect differences in resource-use strategies; however, information on the coordination of these traits during the seedling stage remains limited. This study aimed to evaluate leaf functional trait variation among four mangrove species (*Avicennia alba*, *Bruguiera gymnorrhiza*, *Bruguiera parviflora*, and *Rhizophora apiculata*) by analyzing leaf economic traits, leaf morphological traits, and their interrelationships. A total of 120 seedlings grown under relatively uniform nursery conditions were evaluated. The measured traits included *Specific Leaf Area* (SLA), *Leaf Dry Matter Content* (LDMC), *Aspect Ratio* (AR), and *Shrinkage Index* (SI). Data were analyzed using descriptive statistics, one-way analysis of variance (ANOVA) followed by Duncan's Multiple Range Test (DMRT), and Principal Component Analysis (PCA). The results showed that all measured traits differed significantly among species ($P < 0.05$), with effect sizes ranging from moderate to very large. PCA revealed that the first two principal components explained 73.75% of the total variation in leaf traits, indicating that interspecific variation was driven by the coordination of multiple leaf traits rather than by a single trait. These findings demonstrate that a multivariate approach provides a more comprehensive understanding of leaf functional trait variation among mangrove seedlings.

Keywords: Aspect Ratio; Leaf Dry Matter Content; Mangrove; Principal Component Analysis; Specific Leaf Area.

Pendahuluan

Mangrove merupakan kelompok tumbuhan berkayu yang mendominasi ekosistem pesisir tropis dan memiliki karakter fungsional yang berperan penting dalam mempertahankan stabilitas dan keberlanjutan ekosistem pesisir (Alongi, 2020; Nugraha *et al.*, 2024; Tomlinson, 2016). Indonesia memiliki luasan mangrove terbesar di dunia sehingga ekosistem ini berkontribusi besar terhadap konservasi keanekaragaman hayati, penyimpanan karbon biru, perlindungan garis pantai, serta penyediaan berbagai jasa ekosistem bagi masyarakat pesisir (Macreadie *et al.*, 2021; Nugraha *et al.*, 2026). Kemampuan setiap spesies mangrove untuk bertahan dan

tumbuh pada lingkungan pesisir yang dinamis tidak hanya ditentukan oleh karakter morfologi dan anatomi, tetapi juga oleh karakter fisiologi dan karakter fungsional yang dimilikinya (Friess *et al.*, 2019).

Karakter fungsional daun merupakan salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam ekologi tumbuhan untuk menjelaskan strategi penggunaan sumber daya serta variasi sifat antarspesies. Di antara berbagai karakter fungsional daun, *Specific Leaf Area* (SLA) dan *Leaf Dry Matter Content* (LDMC) merupakan dua indikator utama yang mencerminkan keseimbangan antara kapasitas akuisisi sumber daya dan investasi biomassa daun (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013). Kedua karakter tersebut menjadi dasar konsep *Leaf Economics*

Spectrum (LES), yaitu suatu gradien strategi ekonomi daun yang menggambarkan *trade-off* antara strategi akuisitif melalui peningkatan luas daun spesifik dan strategi konservatif melalui investasi jaringan daun yang lebih besar (Reich, 2014; Wright *et al.*, 2004). Pada mangrove, koordinasi antara SLA dan LDMC telah dilaporkan berperan dalam membedakan strategi fungsional antarspesies serta mencerminkan respons tumbuhan terhadap variasi kondisi lingkungan (Cao *et al.*, 2023; Quadros *et al.*, 2021).

Meskipun karakter fungsional daun telah banyak dimanfaatkan untuk menjelaskan variasi strategi tumbuhan pada berbagai ekosistem, informasi mengenai koordinasi karakter fungsional daun pada fase semai mangrove masih relatif terbatas, terutama pada spesies yang umum dijumpai di kawasan pesisir tropis. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih menitikberatkan pada respons satu atau dua karakter daun terhadap gradien lingkungan atau membandingkan spesies yang tumbuh pada habitat berbeda, sehingga hubungan antarberbagai karakter fungsional daun pada kondisi lingkungan yang seragam masih belum banyak dikaji (Quadros *et al.*, 2021). Padahal, pendekatan berbasis karakter (*trait-based approach*) yang dipadukan dengan analisis multivariat mampu mengungkap pola koordinasi antarparameter yang tidak dapat dijelaskan melalui analisis setiap karakter secara terpisah (Cao *et al.*, 2023; Díaz *et al.*, 2015; Jolliffe & Cadima, 2016).

Pengamatan karakter fungsional daun pada kondisi lingkungan yang relatif seragam memberikan peluang untuk mengevaluasi sejauh mana variasi karakter daun mencerminkan perbedaan intrinsik antarspesies dengan meminimalkan pengaruh variasi lingkungan selama pertumbuhan semai. Pendekatan ini penting karena karakter fungsional tumbuhan dipengaruhi oleh interaksi antara faktor genetik dan lingkungan, sehingga pengamatan pada kondisi persemaian yang seragam memungkinkan identifikasi pola variasi yang lebih merepresentasikan karakteristik masing-masing spesies (Díaz *et al.*, 2015; Quadros *et al.*, 2021). Informasi tersebut diharapkan dapat menjadi dasar untuk memahami diferensiasi karakter fungsional antarspesies sebelum dilakukan pengujian

lebih lanjut pada kondisi habitat alami yang lebih kompleks.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi variasi karakter fungsional daun pada empat spesies mangrove, yaitu *Avicennia alba*, *Bruguiera gymnorrhiza*, *Bruguiera parviflora*, dan *Rhizophora apiculata*, pada fase semai melalui analisis karakter ekonomi daun, karakter morfologi daun, serta hubungan antarparameter menggunakan pendekatan multivariat. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya informasi mengenai variasi karakter fungsional daun pada fase semai mangrove serta menjadi dasar bagi pengembangan penelitian ekologi fungsional mangrove di masa mendatang.

Bahan dan Metode

Waktu dan Lokasi

Penelitian dilaksanakan pada November 2025 hingga Januari 2026 di Laboratorium Kehutanan, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia. Semai mangrove diperoleh dari Persemaian Ekowisata Mangrove Sungai Bersejarah, Desa Kayu Ara Permai, Kecamatan Sungai Apit, Kabupaten Siak, Riau (1°06'51" LU; 102°11'34" BT). Persemaian berupa persemaian sederhana dengan naungan paranet 70% dan masih dipengaruhi dinamika pasang surut kawasan pesisir Sungai Siak. Karakteristik lingkungan persemaian pada saat pengambilan sampel disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik lingkungan di Persemaian

No	Parameter lingkungan	Nilai
1.	Suhu air (°C)	29
2.	Salinitas (‰)	14,6
3.	pH tanah	6,9
4.	Jenis substrat	Lumpur
5.	Kelembapan (%)	71
6.	Intensitas cahaya (lux)	3.630

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi jangka sorong digital, timbangan analitik, oven pengering, perangkat GPS (*Global Positioning System*), serta perangkat komputer untuk pengolahan dan analisis data. Bahan penelitian berupa semai mangrove dari empat spesies, yaitu *A. alba*, *R. apiculata*, *B. gymnorrhiza*, dan *B.*

parviflora, yang seluruhnya berasal dari persemaian yang sama. Bibit berumur sekitar tiga bulan, dipilih dalam kondisi sehat dan bebas dari gejala hama maupun penyakit. Sebanyak 30 individu dipilih secara acak untuk setiap spesies sehingga total sampel penelitian berjumlah 120 individu.

Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian komparatif dengan pendekatan kuantitatif menggunakan rancangan observasional. Faktor yang dibandingkan adalah spesies mangrove, sedangkan seluruh semai diamati pada kondisi persemaian yang sama tanpa pemberian perlakuan eksperimental. Setiap spesies diwakili oleh 30 individu semai sebagai ulangan biologis sehingga total unit analisis berjumlah 120 individu. Dengan kondisi persemaian yang relatif seragam selama pengamatan, perbedaan karakter daun yang diamati diinterpretasikan sebagai variasi antarspesies tanpa mengaitkannya secara langsung dengan hubungan sebab-akibat terhadap faktor lingkungan.

Prosedur Penelitian

Sebanyak 30 individu semai sehat dipilih secara acak dari setiap spesies. Seluruh daun yang telah membuka sempurna (*fully expanded leaves*) pada setiap individu digunakan sebagai sampel pengamatan. Setiap daun diukur secara individual meliputi panjang, lebar, dan berat basah menggunakan jangka sorong digital dan timbangan analitik. Luas daun kemudian diestimasi berdasarkan panjang, lebar, dan faktor koreksi bentuk daun sesuai kategori morfologi masing-masing spesies. Selanjutnya, seluruh daun dikeringkan dalam oven pada suhu 70 °C selama 48 jam hingga mencapai berat konstan untuk memperoleh berat kering. Perhitungan parameter dilakukan pada tingkat individu berdasarkan seluruh daun yang diukur pada masing-masing semai.

Parameter Pengamatan

Karakter daun yang diamati dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu karakter morfologi daun dan karakter fungsional daun. Karakter morfologi meliputi luas daun (*leaf area*), *Aspect Ratio* (AR), dan *Shrinkage Index* (SI), sedangkan karakter fungsional daun terdiri atas *Specific Leaf Area* (SLA) dan *Leaf Dry*

Matter Content (LDMC). Masing-masing parameter dihitung sebagai berikut:

Specific Leaf Area (SLA)

SLA dihitung sebagai rasio antara total luas daun dan total berat kering daun pada setiap individu semai menggunakan persamaan berikut (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013):

$$SLA = \frac{LA}{\sum_{i=1}^n DW_i}$$

$$LA = \sum_{i=1}^n (L_i \times B_i) \times CF_i$$

Keterangan:

SLA = *Specific Leaf Area* (cm² g⁻¹)

LA = luas daun (cm²)

L_i = panjang daun ke-*i* (cm)

B_i = lebar daun ke-*i* (cm)

CF_i = *correction factor* daun ke-*i* (Tabel 2.)

DW_i = berat kering daun ke-*i* (g)

n = jumlah daun pada setiap individu semai

Tabel 2. *Correction factor* yang digunakan dalam estimasi luas daun

Spesies	Bentuk Daun	CF
<i>Avicennia alba</i>	<i>Lanceolate</i>	0,70
<i>Rhizophora apiculata</i>	<i>Elliptic</i>	0,69
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	<i>Oblong</i>	0,73
<i>Bruguiera parviflora</i>	<i>Lanceolate</i>	0,70

Luas daun diestimasi menggunakan pendekatan *correction factor* (Schrader *et al.*, 2021) dilanjutkan dengan penentuan kategori morfologi daun (Tomlinson, 2016).

Aspect Ratio (AR)

AR dihitung sebagai rasio antara panjang dan lebar daun menggunakan persamaan berikut (Schrader *et al.*, 2021):

$$AR_i = \frac{L_i}{B_i}$$

Keterangan:

AR_i = *aspect ratio* daun ke-*i*

L_i = panjang daun ke-*i* (cm)

B_i = lebar daun ke-*i* (cm)

Nilai AR_i dihitung untuk setiap daun, kemudian dirata-ratakan sehingga diperoleh satu nilai AR pada setiap individu semai.

Leaf Dry Matter Content (LDMC)

LDMC dihitung sebagai rasio antara total berat kering daun dan total berat basah daun pada setiap individu semai menggunakan persamaan berikut (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013):

$$LDMC = \frac{\sum_{i=1}^n DW_i}{\sum_{i=1}^n FW_i}$$

Keterangan:

LDMC = Leaf Dry Matter Content (g g⁻¹)

DW_i = berat kering daun ke-*i* (g)

FW_i = berat basah daun ke-*i* (g)

n = jumlah daun pada setiap individu semai

Shrinkage Index (SI)

SI dihitung berdasarkan perubahan lebar daun sebelum dan sesudah proses pengeringan (Tomaszewski & Górkowska, 2016) menggunakan persamaan berikut:

$$SI (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (Bf_i - Bd_i)}{\sum_{i=1}^n Bf_i} \times 100$$

Keterangan:

SI = Shrinkage Index (%)

Bf_i = lebar daun ke-*i* sebelum pengeringan (cm)

Bd_i = lebar daun ke-*i* setelah pengeringan (cm)

n = jumlah daun pada setiap individu semai

Analisis Data

Seluruh analisis statistik dilakukan pada tingkat individu semai sebagai unit analisis, dengan setiap individu direpresentasikan oleh nilai rata-rata parameter dari seluruh daun yang diukur. Statistik deskriptif digunakan untuk menyajikan nilai rerata dan simpangan baku setiap parameter. Sebelum analisis komparatif, data diuji normalitasnya menggunakan uji Shapiro–Wilk dan homogenitas ragam menggunakan uji Levene (Shapiro & Wilk, 1965). Perbedaan karakter morfologi dan karakter fungsional daun antarspesies dianalisis menggunakan *One-Way Analysis of Variance* (*One-Way ANOVA*). Besarnya pengaruh spesies dinyatakan menggunakan *eta squared* (η²) sebagai ukuran *effect size* (Lakens, 2013), sedangkan perbedaan rerata antarspesies diuji lanjut menggunakan Duncan's Multiple Range Test (DMRT) pada taraf nyata 5% (Duncan, 1955). Hubungan antarp parameter daun dianalisis menggunakan *Principal Component Analysis*

(PCA) berdasarkan matriks korelasi dari data yang telah distandardisasi (z-score) untuk mengevaluasi pola koordinasi antarp parameter (Jolliffe & Cadima, 2016). Seluruh analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak R versi 4.3.2.

Hasil dan Pembahasan

Karakter fungsional daun empat spesies mangrove

Karakter fungsional daun keempat spesies mangrove menunjukkan variasi yang nyata pada seluruh parameter yang diamati (Tabel 3). Nilai SLA tertinggi ditemukan pada *B. gymnorrhiza* (179,50 ± 40,71 cm² g⁻¹) dan *B. parviflora* (178,63 ± 33,00 cm² g⁻¹), sedangkan *R. apiculata* memiliki nilai SLA terendah (120,28 ± 10,20 cm² g⁻¹). Sebaliknya, LDMC tertinggi dijumpai pada *A. alba* (0,216 ± 0,013), sedangkan *B. gymnorrhiza* memiliki nilai terendah (0,187 ± 0,033). Pada parameter AR, *A. alba* menunjukkan nilai tertinggi (8,16 ± 1,54), sedangkan kedua spesies *Bruguiera* dan *R. apiculata* memiliki nilai yang lebih rendah. Nilai SI tertinggi ditemukan pada *R. apiculata* (28,12 ± 5,33) dan tidak berbeda nyata dengan *A. alba* (26,01 ± 7,29), sedangkan kedua spesies *Bruguiera* memiliki nilai SI yang lebih rendah.

Setiap spesies mangrove memiliki strategi pembentukan daun yang berbeda meskipun seluruh semai berasal dari umur yang sama dan dipelihara pada kondisi persemaian yang relatif seragam. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa variasi karakter ekonomi daun yang diamati lebih mencerminkan karakteristik intrinsik masing-masing spesies daripada pengaruh lingkungan selama masa pertumbuhan (Kashem *et al.*, 2026). Karakter ekonomi daun secara umum menggambarkan strategi penggunaan sumber daya tumbuhan melalui keseimbangan antara investasi biomassa daun dan kapasitas akuisisi sumber daya, yang dikenal sebagai LES (Wright *et al.*, 2004). Dalam konsep tersebut, daun dengan nilai SLA tinggi umumnya memiliki luas permukaan yang lebih besar per satuan biomassa kering sehingga mendukung strategi akuisisi sumber daya yang lebih cepat, sedangkan daun dengan nilai LDMC tinggi menunjukkan investasi biomassa yang lebih besar pada jaringan daun dan mencerminkan strategi penggunaan sumber daya yang lebih

konservatif (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

Pola koordinasi antara SLA dan LDMC juga telah banyak dilaporkan pada tumbuhan mangrove. Karakter ekonomi daun tidak bekerja secara terpisah, tetapi berinteraksi dengan karakter hidraulik, ukuran daun, dan karakter morfologi lainnya sebagai bagian dari strategi fungsional setiap spesies (Cao et al., 2023; Qie et al., 2024; Yu et al., 2023). Kajian mengenai karakter fungsional mangrove juga menunjukkan bahwa variasi SLA dan LDMC berkaitan dengan perbedaan alokasi biomassa dan efisiensi penggunaan sumber daya antarspesies, sehingga membentuk strategi pertumbuhan yang berbeda

pada setiap takson (Quadros et al., 2021). Selain itu, koordinasi karakter daun pada mangrove menunjukkan pola yang lebih kompleks dibandingkan model LES global karena dipengaruhi oleh kombinasi karakter morfologi, fisiologi, dan lingkungan yang berbeda pada masing-masing spesies (Wei et al., 2025). Hasil penelitian ini mendukung pola tersebut, ditunjukkan oleh kedua spesies *Bruguiera* yang memiliki SLA lebih tinggi disertai nilai LDMC yang relatif lebih rendah dibandingkan *A. alba*, sehingga mengindikasikan strategi penggunaan sumber daya yang berbeda antarspesies.

Tabel 3. Rerata karakter fungsional daun empat spesies mangrove

Species	SLA	LDMC	AR	SI
<i>Avicennia alba</i>	135.30 ± 11.68 ^b	0.216 ± 0.013 ^a	8.16 ± 1.54 ^a	26.01 ± 7.29 ^a
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	179.50 ± 40.71 ^a	0.187 ± 0.033 ^c	2.58 ± 0.40 ^c	19.35 ± 4.68 ^b
<i>Bruguiera parviflora</i>	178.63 ± 33.00 ^a	0.206 ± 0.046 ^{ab}	3.16 ± 0.46 ^b	17.29 ± 4.56 ^b
<i>Rhizophora apiculata</i>	120.28 ± 10.20 ^c	0.199 ± 0.015 ^{bc}	2.62 ± 0.22 ^c	28.12 ± 5.33 ^a

Keterangan: Nilai disajikan sebagai rerata ± simpangan baku (SD) (n = 30 individu per spesies). Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata antarspesies berdasarkan Duncan's Multiple Range Test pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. SLA = *Specific Leaf Area*; LDMC = *Leaf Dry Matter Content*; AR = *Aspect Ratio*; SI = *Shrinkage Index*.

Selain karakter ekonomi daun, keempat spesies juga menunjukkan variasi pada karakter morfologi daun yang tercermin dari nilai AR dan SI. *A. alba* memiliki nilai AR tertinggi, sedangkan kedua spesies *Bruguiera* dan *R. apiculata* menunjukkan nilai AR yang lebih rendah. Sebaliknya, nilai SI tertinggi ditemukan pada *R. apiculata* dan *A. alba*, sedangkan kedua spesies *Bruguiera* memiliki nilai SI yang relatif lebih rendah. Variasi karakter morfologi daun merupakan bagian dari keragaman karakter fungsional mangrove yang berkontribusi terhadap perbedaan struktur dan bentuk daun antarspesies (Quadros et al., 2021). Variasi tersebut juga dipengaruhi oleh kombinasi berbagai karakter morfologi dan kondisi lingkungan, sehingga bentuk daun menjadi salah satu komponen penting dalam diferensiasi karakter fungsional tumbuhan (Cui et al., 2025). Namun, karena seluruh semai pada penelitian ini dipelihara dalam kondisi lingkungan yang relatif seragam, perbedaan nilai AR dan SI lebih mencerminkan karakteristik morfologi intrinsik masing-masing spesies dibandingkan respons terhadap variasi lingkungan selama pertumbuhan.

Secara keseluruhan, variasi SLA, LDMC, AR, dan SI menunjukkan bahwa setiap spesies mangrove memiliki kombinasi karakter fungsional daun yang berbeda. Karakter ekonomi daun menggambarkan perbedaan strategi alokasi biomassa dan penggunaan sumber daya, sedangkan karakter morfologi daun menunjukkan variasi bentuk dan perubahan dimensi daun antarspesies. Temuan ini mengindikasikan bahwa karakter-karakter daun tidak bekerja secara independen, tetapi membentuk suatu koordinasi karakter fungsional yang membedakan masing-masing spesies, sehingga hubungan antarp parameter perlu dievaluasi menggunakan pendekatan multivariat melalui PCA (Díaz et al., 2016; Cao et al., 2023).

Variasi karakter fungsional daun antarspesies

Analisis varians menunjukkan bahwa seluruh karakter fungsional daun berbeda nyata antarspesies ($P < 0,05$; Tabel 4). Namun demikian, besarnya pengaruh spesies terhadap masing-masing karakter tidak sama. Nilai η^2 menunjukkan bahwa AR memiliki ukuran efek terbesar ($\eta^2 = 0,89$), diikuti oleh SLA ($\eta^2 = 0,49$), *Shrinkage Index* (SI) ($\eta^2 = 0,40$), sedangkan

LDMC memiliki ukuran efek terkecil ($\eta^2 = 0,11$). Berdasarkan kriteria (Lakens, 2013), seluruh parameter menunjukkan ukuran efek besar,

meskipun kontribusi faktor spesies terhadap variasi LDMC relatif lebih rendah dibandingkan parameter lainnya.

Tabel 4. Hasil One-Way ANOVA karakter fungsional daun pada empat spesies mangrove

Parameter	df	F	p-value	η^2	Interpretasi effect
Specific Leaf Area	3, 116	36.74	<0.001	0.49	Besar
Leaf Dry Matter Content	3, 116	4.86	0.003	0.11	Sedang
Aspect Ratio	3, 116	313.80	<0.001	0.89	Besar
Shrinkage Index	3, 116	26.03	<0.001	0.40	Besar

Keterangan: Nilai η^2 (*eta squared*) menunjukkan besarnya pengaruh faktor spesies terhadap variasi masing-masing parameter. Interpretasi ukuran efek mengikuti Lakens, yaitu kecil ($\eta^2 \geq 0,01$), sedang ($\eta^2 \geq 0,06$), dan besar ($\eta^2 \geq 0,14$).

Perbedaan ukuran efek menunjukkan bahwa setiap karakter daun memiliki kemampuan yang berbeda dalam membedakan spesies mangrove. Nilai η^2 yang sangat tinggi pada AR menunjukkan bahwa sebagian besar variasi bentuk daun dijelaskan oleh perbedaan spesies, sedangkan proporsi variasi LDMC yang dijelaskan oleh faktor spesies relatif lebih kecil dibandingkan parameter lainnya. Dengan demikian, karakter morfologi daun pada penelitian ini memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam membedakan spesies dibandingkan beberapa karakter ekonomi daun (Lakens, 2013).

Perbedaan tingkat diferensiasi antarparameter tersebut sejalan dengan konsep bahwa setiap karakter fungsional memiliki tingkat konservatisme dan plastisitas yang berbeda. Beberapa karakter daun relatif stabil sehingga lebih mencerminkan identitas spesies, sedangkan karakter lainnya lebih responsif terhadap variasi fisiologis maupun kondisi tumbuh (Wei *et al.*, 2025). Pada mangrove, koordinasi antartrait tidak berlangsung secara seragam karena setiap kelompok karakter dikendalikan oleh mekanisme biologis yang berbeda sehingga tingkat variasinya juga berbeda antarparameter (Cui *et al.*, 2025; Quadros *et al.*, 2021).

Nilai η^2 yang relatif lebih rendah pada LDMC tidak menunjukkan bahwa karakter tersebut kurang penting secara ekologis, tetapi mengindikasikan bahwa proporsi variasi LDMC yang dijelaskan oleh perbedaan spesies lebih kecil dibandingkan variasi AR maupun SLA. Keseragaman umur semai dan kondisi persemaian yang relatif homogen kemungkinan turut berkontribusi terhadap kecilnya variasi LDMC antarspesies yang diamati pada penelitian

ini. Sebaliknya, AR tetap menunjukkan perbedaan yang kuat antarspesies, mengindikasikan bahwa karakter tersebut lebih merepresentasikan karakteristik morfologi intrinsik masing-masing spesies dibandingkan respons terhadap kondisi lingkungan selama penelitian (Cao *et al.*, 2023; Quadros *et al.*, 2021).

Secara keseluruhan, hasil ANOVA dan ukuran efek menunjukkan bahwa identitas spesies merupakan faktor utama yang membedakan karakter fungsional daun, meskipun besarnya kontribusi berbeda pada setiap parameter. Temuan tersebut menunjukkan bahwa diferensiasi karakter fungsional daun antarspesies merupakan hasil koordinasi beberapa karakter daun yang memiliki tingkat konservatisme berbeda (Díaz *et al.*, 2015), sehingga hubungan antarparameter perlu dievaluasi secara simultan menggunakan PCA untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai pola variasi karakter fungsional daun (Jolliffe & Cadima, 2016).

Koordinasi karakter fungsional daun berdasarkan Principal Component Analysis

PCA dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antarparameter karakter fungsional daun serta mengidentifikasi dimensi utama yang membedakan empat spesies mangrove. Hasil PCA menunjukkan bahwa dua komponen utama pertama mampu menjelaskan 73,75% variasi total data, dengan kontribusi sebesar 48,39% pada PC1 dan 25,36% pada PC2 (Tabel 5). Nilai loading menunjukkan bahwa SLA memberikan kontribusi positif terbesar terhadap PC1 (0,620), sedangkan LDMC (0,621) dan SI (-0,781) merupakan parameter yang paling berkontribusi

terhadap PC2. Sementara itu, AR memiliki kontribusi sedang pada PC1 ($-0,455$) dan relatif kecil pada PC2 ($0,056$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa dua komponen utama telah mampu merepresentasikan sebagian besar variasi karakter fungsional daun sehingga layak digunakan untuk menginterpretasikan hubungan antarparameter dan pola diferensiasi spesies.

Tabel 5. Eigenvalue, proporsi variasi, dan nilai loading Principal Component Analysis (PCA) berdasarkan karakter fungsional daun empat spesies mangrove

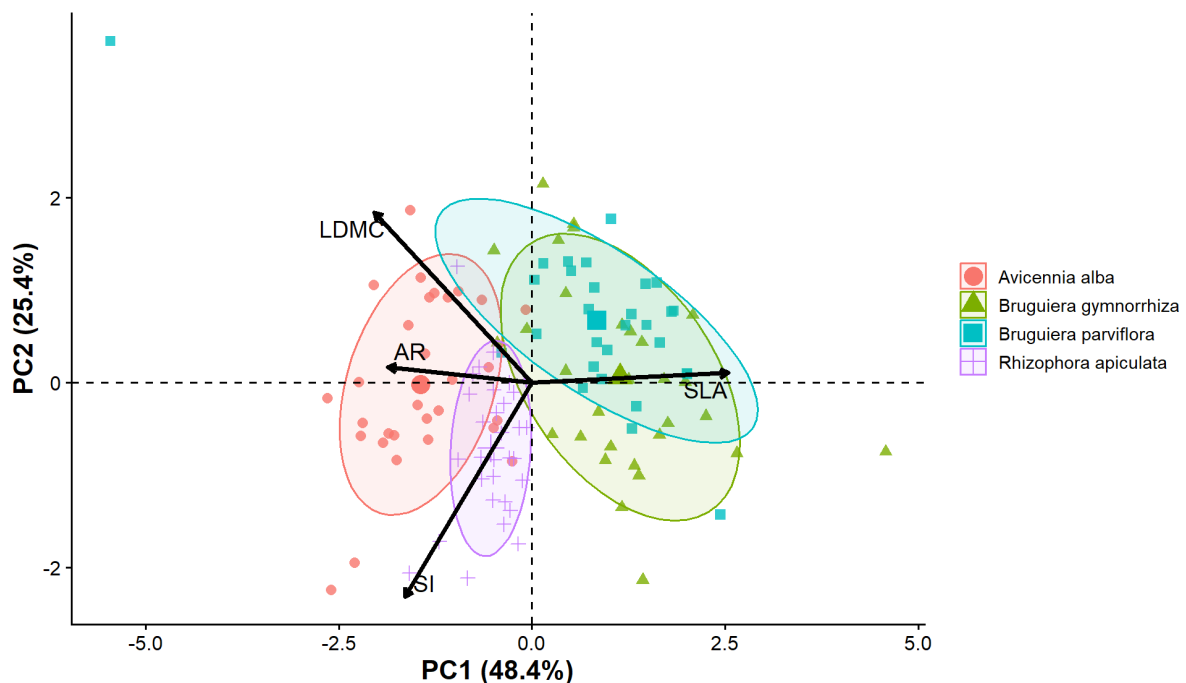
Variabel / Komponen	PC1	PC2
Eigenvalue	1.94	1.01
Variansi (%)	48.39	25.36
Variansi kumulatif (%)	48.39	73.75
Specific Leaf Area	0.620	0.035
Leaf Dry Matter Content	-0.498	0.621
Aspect Ratio	-0.455	0.056
Shrinkage Index	-0.401	-0.781

Keterangan: PCA dilakukan menggunakan data yang telah distandardisasi (z-score). Nilai loading menunjukkan korelasi antara masing-masing variabel dengan komponen utama.

Visualisasi hubungan antarparameter dan distribusi spesies dalam ruang multivariat disajikan pada biplot PCA (Gambar 2). Dua komponen utama pertama menjelaskan 73,75%

variasi total karakter daun, menunjukkan bahwa sebagian besar variasi antarspesies dapat dijelaskan oleh kombinasi beberapa karakter fungsional daun. Pola tersebut memperlihatkan bahwa hubungan antarparameter tidak berlangsung secara independen, tetapi membentuk koordinasi karakter yang membedakan setiap spesies. Komponen utama pertama (PC1) terutama dipengaruhi oleh hubungan antara SLA, LDMC, AR, dan SI.

Hubungan yang berlawanan antara SLA dan LDMC mencerminkan *trade-off* antara peningkatan luas daun spesifik dan investasi biomassa daun yang merupakan karakteristik utama LES (Poorter *et al.*, 2009). Pola serupa juga dilaporkan pada mangrove, di mana koordinasi antara karakter ekonomi daun dan karakter morfologi membentuk strategi fungsional spesies yang berbeda (Cao *et al.*, 2023; Quadros *et al.*, 2021). Selain itu, koordinasi antartrait pada mangrove diketahui bersifat multidimensi sehingga variasi antarspesies merupakan hasil integrasi beberapa karakter daun yang bekerja secara simultan (Wei *et al.*, 2025). Dengan demikian, PC1 pada penelitian ini merepresentasikan gradien variasi strategi ekonomi daun yang dibentuk oleh kombinasi beberapa karakter fungsional, bukan oleh satu karakter tunggal.



Gambar 2. PCA biplot berdasarkan karakter fungsional daun empat spesies mangrove

Komponen utama kedua (PC2) terutama dipengaruhi oleh LDMC dan SI, menunjukkan bahwa kedua karakter tersebut memberikan kontribusi penting terhadap variasi yang tidak sepenuhnya dijelaskan oleh PC1. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi karakter fungsional daun pada empat spesies mangrove tidak hanya berkaitan dengan gradien ekonomi daun, tetapi juga melibatkan karakter struktural daun yang berkontribusi terhadap pemisahan spesies dalam ruang multivariat. Penelitian pada mangrove menunjukkan bahwa strategi fungsional daun dibentuk oleh beberapa kelompok karakter yang saling berinteraksi sehingga pendekatan multivariat lebih mampu menggambarkan hubungan antartrait dibandingkan analisis setiap karakter secara terpisah (Jiang *et al.*, 2024; Wu *et al.*, 2025).

Distribusi spesies pada biplot PCA menunjukkan bahwa setiap spesies memiliki kombinasi karakter fungsional yang berbeda. *B. gymnorrhiza* dan *B. parviflora* menempati area yang relatif berdekatan pada sisi positif PC1 dan berasosiasi dengan nilai SLA yang lebih tinggi, sejalan dengan hasil analisis deskriptif dan ANOVA. Sebaliknya, *A. alba* cenderung berada pada sisi negatif PC1 dan berasosiasi dengan nilai AR dan LDMC yang lebih tinggi, sedangkan *R. apiculata* berada pada sisi negatif PC2 yang berkaitan dengan nilai SI yang relatif lebih tinggi. Pola tersebut menunjukkan bahwa pemisahan antarspesies merupakan hasil kombinasi beberapa karakter daun yang bekerja secara simultan, sehingga pendekatan multivariat mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai diferensiasi karakter fungsional dibandingkan analisis setiap karakter secara terpisah (Cui *et al.*, 2025; Díaz *et al.*, 2015). Secara keseluruhan, integrasi hasil analisis deskriptif, ANOVA, dan PCA menunjukkan bahwa karakter fungsional daun pada empat spesies mangrove dibedakan oleh kombinasi karakter ekonomi dan karakter morfologi daun. Analisis deskriptif menunjukkan adanya variasi rerata karakter antarspesies, ANOVA mengonfirmasi bahwa variasi tersebut berbeda nyata dengan besaran efek yang berbeda pada setiap parameter, sedangkan PCA memperlihatkan bahwa seluruh karakter tersebut tersusun dalam dua dimensi utama yang secara bersama-sama menjelaskan sebagian besar variasi karakter daun. Temuan ini menunjukkan

bahwa pendekatan multivariat mampu melengkapi analisis univariat dengan menjelaskan bagaimana berbagai karakter daun berinteraksi dalam membentuk diferensiasi antarspesies, sehingga memberikan pemahaman yang lebih utuh mengenai variasi karakter fungsional daun pada fase semai mangrove (Rahman *et al.*, 2024).

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa empat spesies mangrove pada fase semai memiliki variasi karakter fungsional daun yang berbeda antarspesies. Variasi tersebut tercermin pada SLA, LDMC, AR, dan SI. Analisis deskriptif, ANOVA, dan PCA secara konsisten menunjukkan bahwa perbedaan antarspesies dibentuk oleh koordinasi beberapa karakter daun, sehingga pendekatan multivariat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai variasi karakter fungsional daun dibandingkan evaluasi setiap karakter secara terpisah.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis ucapkan kepada semua pihak yang terlibat dalam penelitian ini.

Referensi

- Alongi, D. M. (2020). Global Significance of Mangrove Blue Carbon in Climate Change Mitigation. *Sci 2020, Vol. 2, Page 67*, 2(3), 67. <https://doi.org/10.3390/SCI2030067>
- Cao, J. J., Chen, J., Yang, Q. P., Xiong, Y. M., Ren, W. Z., & Kong, D. L. (2023). Leaf hydraulics coordinated with leaf economics and leaf size in mangrove species along a salinity gradient. *Plant Diversity*, 45(3), 309–314. <https://doi.org/10.1016/J.PLD.2022.01.002>
- Cui, J., He, C., Du, L., Chen, Q., Wang, M., Yu, Z., Sun, Z., & Chen, Q. (2025). Geographic patterns and drivers of leaf functional traits in mangrove forests across Hainan Island: Climate dominance and context-dependent mechanisms. *Global Ecology and Conservation*, 64, e03936. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2025.E03936>
- Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H. C., Wright,

- I. J., Lavorel, S., Dray, S., Reu, B., Kleyer, M., Wirth, C., Colin Prentice, I., Garnier, E., Bönsch, G., Westoby, M., Poorter, H., Reich, P. B., Moles, A. T., Dickie, J., Gillison, A. N., Zanne, A. E., ... Gorné, L. D. (2015). The global spectrum of plant form and function. *Nature* 2015 529:7585, 529(7585), 167–171. <https://doi.org/10.1038/nature16489>
- Duncan, D. B. (1955). Multiple Range and Multiple F Tests. *Biometrics*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.2307/3001478>
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., Lucas, R., Primavera, J., Rajkaran, A., & Shi, S. (2019). The State of the World's Mangrove Forests: Past, Present, and Future. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(Volume 44, 2019), 89–115. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ENVIRON-101718-033302/CITE/REFWORKS>
- Jiang, D., Nie, T., He, Q., Yan, J., Feng, E., & Ye, Q. (2024). A Trade-Off Between Leaf Carbon Economics and Plant Size Among Mangrove Species in Dongzhaigang, China. *Ecology and Evolution*, 14(11), e70559. <https://doi.org/10.1002/ECE3.70559>;PAG EGROU:STRING:PUBLICATION
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 374(2065). <https://doi.org/10.1098/RSTA.2015.0202/115142>
- Kashem, M. A., Rahman, M. A., & Hossain, M. Z. (2026). Species-specific leaf trait variation in dominant mangrove tree species across contrasting salinity zones in the Sundarbans, Bangladesh. *Journal of Aquatic Plants*, 2, 100012. <https://doi.org/10.1016/J.JAP.2026.100012>
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4(NOV), 62627. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2013.00863/TEXT>
- Macreadie, P. I., Costa, M. D. P., Atwood, T. B., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Lovelock, C. E., Serrano, O., & Duarte, C. M. (2021). Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment* 2021 2:12, 2(12), 826–839. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
- Nugraha, L. A., Kusmana, C., & Hartoyo, A. P. P. (2024). The growth performance of *Kandelia candel* hypocotyl cuttings seedlings for mangrove rehabilitation in Indonesia. *Biodiversitas*, 25(8), 2683–2695. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d250841>
- Nugraha, L. A., Sarno, Marisa, H., Maharani, F. E., Sabri, E. T. B., Ikhsani, H., Putra, A. K., & Agustina, D. T. (2026). Estimation of the carbon stock and carbon dioxide sequestration potential of *Kandelia candel* in Sembilang National Park, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1632(1), 012063. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1632/1/012063>
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., De Vos, A. C., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167–234. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., & Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis. *New Phytologist*, 182(3), 565–588. <https://doi.org/10.1111/J.1469-8137.2009.02830.X>;ISSUE:ISSUE:DOI
- Qie, Y. D., Zhang, Q. W., McAdam, S. A. M., & Cao, K. F. (2024). Stomatal dynamics are regulated by leaf hydraulic traits and guard cell anatomy in nine true mangrove species. *Plant Diversity*, 46(3), 395–405. <https://doi.org/10.1016/J.PLD.2024.02.003>
- Quadros, A. F., Helfer, V., Nordhaus, I., Reuter, H., & Zimmer, M. (2021). Functional traits of terrestrial plants in the intertidal: A

- review on mangrove trees. *Biological Bulletin*, 241(2), 123–139. <https://doi.org/10.1086/716510>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Rahman, M. M., Zimmer, M., Donato, D., Ahmed, I., Xu, M., & Wu, J. (2024). Functional composition outweighs taxonomic and functional diversity in maintaining ecosystem properties and processes of mangrove forests. *Global Change Biology*, 30(1). <https://doi.org/10.1111/GCB.17152>
- Reich, P. B. (2014). The world-wide “fast-slow” plant economics spectrum: A traits manifesto. *Journal of Ecology*, 102(2), 275–301. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211>;WGROU:STRING:PUBLIC ATION
- Schrader, J., Shi, P., Royer, D. L., Peppe, D. J., Gallagher, R. V., Li, Y., Wang, R., & Wright, I. J. (2021). Leaf size estimation based on leaf length, width and shape. *Annals of Botany*, 128(4), 395–406. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCAB078>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Tomaszewski, D., & Górkowska, A. (2016). Is Shape of a Fresh and Dried Leaf the Same? *PLOS ONE*, 11(4), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153071>
- Tomlinson, P. B. (2016). *The Botany of Mangroves*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139946575>
- Wei, L., Lin, F., Gao, J., Rugema, J., Akram, W., & Wang, Y. S. (2025). Complexity of leaf trait covariation for mangrove species. *Npj Biodiversity*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/S44185-025-00077-7>
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., ... Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* 2004 428:6985, 428(6985), 821–827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Wu, H., Yang, Q., Chen, J., Lu, M., Ren, W., Xiong, Y., Pei, Y., Chand, P. B., Valverde-Barrantes, O. J., Cao, J., & Kong, D. (2025). Divergent leaf–root coordination between mangroves and non-mangroves. *Journal of Plant Ecology*, 18(2). <https://doi.org/10.1093/JPE/RTAF023>
- Yu, Z., Wang, M., Sun, Z., Wang, W., & Chen, Q. (2023). Changes in the leaf functional traits of mangrove plant assemblages along an intertidal gradient in typical mangrove wetlands in Hainan, China. *Global Ecology and Conservation*, 48, e02749. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2023.E02749>