

Scientific Article

KEMAMPUAN PENYERAPAN KARBON DIOKSIDA DAN KARAKTER STOMATA PADA POHON-POHON ASLI DATARAN RENDAH TROPIS

Carbondioxide absorption capability and stomatal features of tropical lowland native trees

Danang Wahyu Purnomo^{1,2*}, Lilik Budi Prasetyo¹, Didik Widyatmoko², Siti Badriyah Rushayati¹, Didi Usmadi³, Richa Kusuma Wati⁴, dan Saniyatun Mar'atus Solihah⁵

¹Departemen Konservasi Sumber Daya Hutan dan Ekowisata, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor Jl. Ulin Lingkar Akademik, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680, West Java, Indonesia

²Pusat Riset Konservasi Tumbuhan, Kebun Raya, dan Kehutanan – BRIN, Kawasan Sains dan Teknologi Dr. (H.C.) Ir. Soekarno

³Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi – BRIN, Kawasan Sains dan Teknologi Dr. (H.C.) Ir. Soekarno

⁴Pusat Riset Biosistemika dan Evolusi – BRIN, Kawasan Sains dan Teknologi Dr. (H.C.) Ir. Soekarno
 Jl. Raya Jakarta-Bogor Km. 46, Cibinong, Bogor, Jawa Barat 16911

⁵Departemen Konservasi, PT Mitra Natura Raya, Kebun Raya Bogor. Jl. Ir. H. Juanda No.13 Bogor 16122, Jawa Barat, Indonesia

Informasi Artikel

Diterima/Received : 5 April 2023

Disetujui/Accepted : 28 Agustus 2023

Diterbitkan/Published : 30 Agustus 2023

*Koresponden E-mail :
 dnabdz@yahoo.com

DOI: [10.55981/bkr.2023.1372](https://doi.org/10.55981/bkr.2023.1372)

Cara mengutip

Purnomo DW, Prasetyo LB, Widyatmoko D, Rushayati SB, Usmadi D, Wati RK, Solihah SM. 2023. Kemampuan penyerapan karbon dioksida dan karakter stomata pada pohon-pohon asli dataran rendah tropis. Buletin Kebun Raya 26(2): 84–96.

DOI: [10.55981/bkr.2023.1372](https://doi.org/10.55981/bkr.2023.1372)

Kontributor

Kontributor Utama/Main author:

Danang Wahyu Purnomo
 Lilik Budi Prasetyo
 Didik Widyatmoko
 Siti Badriyah Rushayati
 Didi Usmadi
 Richa Kusuma Wati
 Saniyatun Mar'atus Solihah

Kontributor Anggota/Author member:

-

Keywords: carbon sequestration, native tree species, stomatal character, tropical lowlands

Kata Kunci: dataran rendah tropis, jenis pohon asli, karakter stomata, serapan karbon dioksida

Abstract

The selection of native tree species for land rehabilitation and carbon emission reduction is needed in Indonesia. The ability of CO₂ absorption is determined by the level of plant adaptation, including the character of the stomata. This study aimed to select native tree species that are effective in absorbing CO₂ and evaluate the effect of stomatal characters on carbon absorption capabilities. The tree species were selected based on nativeness, natural habitat in the low lands, large stature, and economic potential. Carbon absorption analysis was carried out by carbohydrates analysis. The variables observed included total leaf area and stomatal characteristics consisting of number, size, and density. The relationship between the predicted variables and absorption was analyzed by linear regression. Our study showed six native tree species have a high potential for CO₂ absorption, including *Terminalia bellirica* (130.17 g/hour), *Pterospermum javanicum* (61.77 g/hour), *Litsea garciae* (59.78 g/hour), *Anisoptera marginata* (54.75 g/hour), *Diospyros frutescens* (44.64 g/hour), and *Canarium vrieseanum* (29.69 g/hour). Stomatal area, density, and sample leaf area did not correlate with CO₂ sink ability. At the tree scale, the total number of stomata, total stomatal area, and total leaf area had a significant effect (P<0.005) and varied on adding CO₂ mass during photosynthesis. The strong effect on CO₂ mass occurs in the variable total leaf area (R²=0.698), the combination of the total number of stomata and total leaf area (R²= 0.700), and the combination of the total number of stomata and total leaf area (R²=0.727).

Abstrak

Pemilihan jenis pohon asli untuk upaya rehabilitasi lahan dan reduksi emisi karbon sangat penting di Indonesia. Kemampuan penyerapan CO₂ ditentukan oleh tingkat adaptasi tumbuhan, termasuk karakter stomata. Tujuan penelitian ini adalah untuk menyeleksi jenis pohon asli yang potensial dalam penyerapan CO₂ dan mengevaluasi pengaruh karakter stomata terhadap kemampuan penyerapan karbon. Seleksi jenis pohon berdasarkan keaslian, habitat alami, perawakan besar, dan potensi ekonomi. Analisis serapan karbon dilakukan dengan uji karbohidrat. Variabel-variabel yang diamati meliputi total luas daun dan karakter stomata yang terdiri dari jumlah, luas, dan kerapatan stomata. Hubungan variabel-variabel bebas dengan daya serap dianalisis dengan regresi linear. Terdapat 6 jenis pohon asli yang memiliki potensi tinggi dalam penyerapan CO₂, yaitu *Terminalia bellirica* (130,17 g/jam), *Pterospermum javanicum* (61,77 g/jam), *Litsea garciae* (59,78 g/jam), *Anisoptera marginata* (54,75 g/jam), *Diospyros frutescens* (44,64 g/jam), dan *Canarium vrieseanum* (29,69 g/jam). Luas stomata, kerapatan stomata, dan luas daun sampel tidak berkorelasi terhadap daya serap CO₂. Pada skala pohon, total jumlah stomata, total luas stomata, dan total luas daun memiliki pengaruh yang signifikan (P<0,005) dan bervariasi terhadap penambahan massa CO₂ selama fotosintesis berlangsung. Pengaruh kuat terhadap massa CO₂ terjadi pada variabel total luas daun (R²=0,698), kombinasi total jumlah stomata dan total luas daun R²=0,700, dan kombinasi jumlah total stomata dan total luas daun (R²=0,727).

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global sebagai dampak dari perkembangan peradaban manusia saat ini menjadi permasalahan yang sangat kompleks di seluruh dunia. Konsumsi energi dunia dari bahan bakar fosil yang semakin meningkat telah menyebabkan peningkatan Gas Rumah Kaca (GRK) di atmosfer. Pada tahun 2019 konsentrasi CO₂ dunia tercatat sebanyak 36,89 miliar metrik ton, meningkat 16% dari tahun 2009 (ClimateWatch 2022). China menjadi penyumbang emisi terbanyak mencapai 27%, diikuti Amerika Serikat 12%, India 6,6%, Indonesia 4%, dan Rusia 3,1%. Meskipun menduduki peringkat 4 emisi karbon total, Indonesia di tahun 2019 memiliki tingkat emisi CO₂ tertinggi dunia dengan 855,37 juta ton dalam hal perubahan lahan dan hutan (ClimateWatch 2022). Pengurangan emisi GRK di tahun 2018 pada sektor kehutanan hanya mencapai 37 juta ton CO₂ (1,29%), masih jauh dari target tahunan yang diharapkan sebesar 497 juta ton CO₂ (atau setara dengan 17,2%) (KLHK 2020).

Fakta bahwa kerusakan lahan dan hutan yang menyebabkan emisi CO₂ dunia jelas sangat perlu diperhatikan oleh Pemerintah Indonesia. Sektor kehutanan harus menjadi prioritas karena hutan merupakan solusi paling efektif untuk mengurangi konsentrasi karbon di atmosfer. Hutan menyerap karbon sebanyak 1 sampai 3 miliar ton karbon per tahun, sedangkan tanah hutan menyerap sebesar 0,4 miliar ton karbon per tahun (Lal 2005). Oleh karena itu, upaya mengembalikan lahan dan hutan memerlukan keterpaduan antar sektor termasuk peran aktif masyarakat. Salah satu upaya riil yang bisa dilakukan adalah penghijauan secara nasional dengan pendekatan konsep restorasi untuk memperbaiki ekosistem sekaligus mereduksi emisi karbon (Indrajaya et al. 2022). Penggunaan jenis asli setempat merupakan pra-syarat untuk memperbaiki dan memulihkan ekosistem (Press & Siever 1982; Ong 2012).

Hingga saat ini, beberapa jenis pohon introduksi masih digunakan untuk program penghijauan nasional, misalnya trembesi atau ki hujan (*Samanea saman*) (Surat Menteri Kehutanan RI Nomor S.86/Menhut-V/2009), jati (*Tectona grandis*), mahoni (*Swietenia mahagoni*), dan gmelina (*Gmelina arborea*) (Surat Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.105/Menlhk/Setjen/Kum.1/12/2018). Penggunaan jenis tumbuhan introduksi berpotensi merusak keseimbangan ekosistem pada masa mendatang (Duchicela et al. 2012). Kasus trembesi yang cenderung dominan dan berpotensi invasif atau mampu mendesak tumbuhan lokal (Staples & Elevitch 2006). Peningkatan populasi jenis trembesi tidak

terkendali dan menekan jenis asli terjadi di Kepulauan Fiji (Taylor et al. 2005).

Aspek lain yang penting dalam pemilihan jenis pohon untuk restorasi lahan dan reduksi emisi karbon adalah karakter pohon terkait efektivitas dalam proses fotosintesis. Fotosintesis merupakan proses kimia untuk menghasilkan energi, di mana karbon dan air diubah menjadi karbohidrat dengan bantuan energi cahaya (Fanindi et al. 2010; Pertamawati 2010). Daun memegang peranan penting dalam proses fotosintesis. Stoma merupakan organ di dalam daun yang menjadi pintu masuk karbon dioksida dari udara untuk dijadikan bahan fotosintesis dan mengeluarkan oksigen sebagai hasilnya. Beberapa penelitian fisiologi daun menyebutkan bahwa luas daun, ketebalan relatif daun, jumlah stomata, umur tanaman dan faktor lingkungan termasuk cahaya yang masuk berpengaruh terhadap daya serap karbon (Sinambela 2006; Sukmawati et al. 2015).

Penelitian tentang jenis pohon potensial untuk sekuestrasi karbon telah banyak dilakukan di Indonesia, misalnya jenis pohon berdaya rosot tinggi di wilayah Bogor (Dahlan 2008; Lailati 2013), serapan karbon beberapa jenis pohon di KR Cibinong (Hidayati et al. 2013), dan kemampuan serapan karbon pada pohon regenerasi alami bekas tambang (Purnomo et al. 2022). Namun demikian, sampel pohon yang digunakan adalah koleksi kebun raya/hutan kota/tegakan hutan yang beragam umur dan aspek lingkungan biofisiknya. Oleh karena itu, perlu penelitian sekuestrasi karbon pada pohon-pohon yang telah diketahui keaslian jenis, daya propagasi untuk ketersediaan bibit, tipe habitat yang sesuai, dan perawakan pohon yang menunjukkan bobot dan lama penyerapan karbon selama pertumbuhannya. Selanjutnya, keterkaitan antara kemampuan penyerapan karbon pohon-pohon asli tersebut dengan karakter stomatanya perlu dikaji lebih mendalam. Tujuan penelitian ini adalah untuk menyeleksi jenis pohon asli yang efektif dalam penyerapan CO₂ dan mengevaluasi pengaruh karakter stomata terhadap kemampuan penyerapan karbon.

BAHAN DAN METODE

Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan kegiatan, dimulai dengan seleksi jenis, pengukuran daya serap karbon, dan analisis data. Pengukuran daya serap dilakukan pada Juli 2015. Pengukuran massa daun dilakukan pada Juli 2015 dan November 2019. Lokasi penelitian dilakukan di Kebun Raya (KR) Bogor (tahap seleksi dan pembibitan) dan KR Cibinong (tahap pertumbuhan dan pengukuran di demplot). Uji karbohidrat dianalisis di Laboratorium Pasca Panen Balai

Besar Penelitian dan Pengembangan Pasca Panen Kementerian Pertanian, Cimanggu Bogor. Pengamatan stomata dilakukan di Laboratorium Treub, Kebun Raya Bogor.

Berdasarkan data BMKG 2015-2019 kondisi lokasi penelitian (Kota Bogor dan Kabupaten Bogor) memiliki tipe iklim sangat basah (Tipe A menurut Schmidt-Ferguson), curah hujan bulanan 300,56 mm, suhu rata-rata 26,04° C, kelembapan udara rata-rata 81,28%, dan lama penyinaran rata-rata 57,20%. Kondisi tanah di KR Bogor sesuai analisis tanah pada 4 titik sampel yaitu; pH 5,27, kandungan C organik 1,59%, unsur P tersedia 4,15 ppm, kapasitas tukar kation (KTK) 19,83 cmol/kg, kejenuhan basa 65%, fraksi pasir 12,25%, debu 38%, dan liat 49,75%. Sementara kondisi tanah di KR Cibinong adalah pH 5,10, kandungan C organik 1,89%, unsur P tersedia 5,05 ppm, kapasitas tukar kation (KTK) 16,44 cmol/kg, kejenuhan basa 61,25%, fraksi pasir 12,5%, debu 39,75%, dan liat 47,75%. Demplot dipilih di Pembibitan KR Cibinong dengan pertimbangan kesesuaian karakter tipe habitat dataran rendah basah.

Bahan dan alat

Bahan utama sebagai obyek penelitian adalah material tumbuhan koleksi KR Bogor (mulai dari biji, *seedling*, hingga tanaman dalam demplot di Pembibitan KR Cibinong). Bahan dan alat laboratorium digunakan untuk analisis karbohidrat dan pengamatan stomata.

Seleksi jenis dan pembuatan demplot

Jenis-jenis pohon diseleksi menggunakan data Registrasi Koleksi KR Bogor dan referensi utama *Plant of the World Online* (POWO 2022) dan *Plant Resources of South-East Asia* (PROSEA 2019). Seleksi dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter yang meliputi: kelokalan jenis (distribusi alami di kawasan Malesia), habitat dataran rendah basah (altitude 0-1000 m dpl.), perawakan besar (diameter >20 cm, tinggi >20 m, dan umur >20 tahun), ketersediaan biji (melimpah setiap tahun), dan memiliki potensi lainnya (kayu, obat, pangan, dan atau keindahan). Sebagai kontrol atau pembanding, ditentukan tiga jenis pohon introduksi.

Jumlah koleksi tumbuhan di KR Bogor (2012) mencapai 3.156 jenis dan 12.141 spesimen, dan 2.907 jenis termasuk jenis asli Indonesia. Pada kategori habitat dataran rendah dan pohon tinggi di atas 20 m terdapat 978 jenis. Dari jumlah tersebut, terdapat 357 jenis yang memiliki jumlah biji melimpah dan 152 jenis memiliki biji melimpah sepanjang tahun. Berdasarkan hasil seleksi didapatkan 16 jenis terpilih dan tiga jenis kontrol dengan kriteria memiliki potensi lain (kayu, buah/material lain, dan keindahan) dan memiliki kesesuaian tempat tumbuh di demplot. Terdapat pula tiga jenis kontrol dari jenis introduksi yang banyak dibudidayakan di Indonesia, yaitu

Samanea saman, *Cassia grandis*, dan *Castilla elastica*. *Samanea saman* atau trembesi merupakan jenis pohon yang masih banyak dijumpai sebagai pohon penghijauan. Karakter pohon trembesi adalah sebagai berikut: pohon berukuran tinggi besar mencapai tinggi 40 m, diameter batang 200 cm, dan memiliki pertumbuhan rata-rata tinggi 0,75 – 1,5 m/tahun (Staples & Elevitch 2006). *Cassia grandis* dan *Castilla elastica* termasuk dalam pohon multifungsi, diantaranya sebagai peneduh, penghias jalan, penghasil beberapa produk obat dan getah, yang banyak dikembangkan di wilayah Asia Tropis (PROSEA 2019).

Penyemaian biji dilakukan secara serempak (setiap jenis 100 biji) di pembibitan dengan perlakuan sama hingga berukuran tinggi 1 – 1,5 m (berumur ±1 tahun) untuk siap ditanam di demplot. Penanaman bibit (setiap jenis ada 10 bibit) diatur dengan mempertimbangkan pemerataan cahaya matahari yang masuk. Pemeliharaan bibit yang dilakukan di demplot antara lain meliputi penyiangan gulma dan pemangkasan pohon sekitar yang mengganggu hingga umur 2 tahun. Setelah itu, bibit dibiarkan tumbuh dengan sendirinya hingga dilakukan pengambilan sampel massa daun secara pemanenan (*destructive method*).

Pengukuran daya serap

Daya serap adalah kemampuan suatu jenis tumbuhan menyerap karbon melalui daun. Pengukuran daya serap karbon menggunakan metode sampel daun (*undistructive method*) dan uji karbohidrat (Daud et al. 2019; Purnomo et al. 2022). Data yang diambil meliputi massa daun per pohon dan massa daun sampel. Daun diambil pada pukul 06.00 dan 10.00 karena untuk mengetahui perbedaan serapan karbon dioksida pada waktu yang berbeda. Metode penghitungan daya serap karbon dioksida bersifat eksperimental, yaitu dengan menggunakan Uji Karbohidrat *by Difference* melalui perbandingan mol (persamaan Avogadro) 9 yakni: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$. Massa $\text{CO}_2 = 1,47 \times \text{massa C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (FAO 2003; Purnomo et al. 2022), kemudian dianalisis dengan mengonversikan massa karbohidrat yang didapat ke daya serap karbon dioksida per daun (massa sampel daun) per jam dan per total massa daun per jam. Perhitungan massa daun total diukur dengan menimbang seluruh bagian daun (pada daun tunggal: lamina dan tangkai daun, pada daun majemuk: anak daun dan tangkai anak daun), sementara tangkai daun dan ibu tulang daun pada daun majemuk dipisahkan. Pada daun majemuk ganda (seperti daun *Samanea saman*), tulang anak daun (*secondary rachis*) dimasukkan dalam bagian daun dan ibu tulang daun (*main rachis*) dipisahkan.

Pengamatan stomata

Pengamatan stomata dilakukan dengan menggunakan metode *stomatal printing*, di mana

preparat stomata dibuat dengan pengolesan *cutex* transparan pada bagian abaksial (permukaan bawah) daun. Kutek bening yang mengandung aseton dibiarkan hingga mengering dan ditutup dengan isolasi bening. Isolasi dikelupas secara perlahan dan hati-hati serta dipastikan irisan epidermis abaksial daun menempel pada selotip. Irisan epidermis direkatkan pada kaca preparat untuk diamati menggunakan mikroskop digital Olympus CX23 yang tersambung dengan komputer. Pengamatan preparat dilakukan mulai dari pembesaran lemah ke pembesaran kuat, sampai mendapatkan tampilan tipe stomata yang jelas. Karakter stomata yang diamati adalah jumlah, panjang, dan kerapatan stomata. Kerapatan stomata adalah jumlah stomata rata-rata per mm^2 . Kerapatan stomata ditentukan dengan perhitungan: jika pembesaran 10 x 10 adalah 0,25 mm, maka luas bidang pandang mikroskop adalah $\pi \times r^2$ ($0,049 \text{ mm}^2$). Bila jumlah stomata adalah n , maka kerapatan stomata per milimeter persegi adalah $1/0,049 \text{ mm}^2 \times n$. Luas stomata ditentukan

dengan rumus $L = \frac{1}{4} \pi ((p + l)/2)^2$, p : panjang stomata (μm) dan l : lebar stomata (μm).

Analisis data

Perbedaan rata-rata massa daun total, massa dan luas daun sampel pada dua umur dianalisis menggunakan *Duncan Test*. Penentuan hubungan karakter stomata dengan daya serap karbon dianalisis menggunakan regresi linear. Terdapat dua pendekatan untuk mengetahui hubungan daya serap karbon dengan karakter stomata, yaitu: 1) daya rosot CO_2 per satuan luas (g/cm^2), untuk mengetahui hubungan kerapatan stomata ($\text{stomata}/\text{mm}^2$) dan luas stomata (μm^2) pada luas bidang sampel daun terhadap daya rosot CO_2 (g/cm^2); dan 2) massa CO_2 terbentuk (g), untuk mengetahui hubungan jumlah stomata, luas stomata, dan luas daun total terhadap massa CO_2 (g) pada 2 umur pengamatan. Transformasi logaritmik dari semua nilai variabel dipilih agar varians heteroskedastisitas dan residu pada kondisi normal. Hubungan antara variabel diformulasikan sebagai berikut:

Eq.1	Daya rosot CO_2 vs Kerapatan stomata	: $\text{Ln}(y_D) = a_K + b_K \text{Ln}(x_K)$
Eq.2	Daya rosot CO_2 vs Luas stomata	: $\text{Ln}(y_D) = a_l + b_l \text{Ln}(x_l)$
Eq.3	Daya rosot CO_2 vs Luas daun sampel	: $\text{Ln}(y_D) = a_a + b_a \text{Ln}(x_a)$
Eq.4	Daya rosot CO_2 vs Kerapatan stomata+Luas stomata	: $\text{Ln}(y_D) = a_{Kl} + b_{Kl} \text{Ln}(x_K) + b_{ll} \text{Ln}(x_l)$
Eq.5	Daya rosot CO_2 vs Kerapatan stomata+Luas daun sampel	: $\text{Ln}(y_D) = a_{Ka} + b_{Ka} \text{Ln}(x_K) + b_{aK} \text{Ln}(x_a)$
Eq.6	Daya rosot CO_2 vs Luas stomata+Luas daun sampel	: $\text{Ln}(y_D) = a_{la} + b_{la} \text{Ln}(x_l) + b_{al} \text{Ln}(x_a)$
Eq.7	Massa CO_2 vs Total jumlah stomata	: $\text{Ln}(y_M) = a_j + b_j \text{Ln}(x_j)$
Eq.8	Massa CO_2 vs Total luas stomata	: $\text{Ln}(y_M) = a_L + b_L \text{Ln}(x_L)$
Eq.9	Massa CO_2 vs Luas daun total	: $\text{Ln}(y_M) = a_A + b_A \text{Ln}(x_A)$
Eq.10	Massa CO_2 vs Total jumlah stomata+Total luas stomata	: $\text{Ln}(y_M) = a_{jL} + b_{jL} \text{Ln}(x_j) + b_{lL} \text{Ln}(x_L)$
Eq.11	Massa CO_2 vs Total jumlah stomata+Luas daun total	: $\text{Ln}(y_M) = a_{jA} + b_{jA} \text{Ln}(x_j) + b_{aJ} \text{Ln}(x_A)$
Eq.12	Massa CO_2 vs Total luas stomata+Luas daun total	: $\text{Ln}(y_M) = a_{LA} + b_{LA} \text{Ln}(x_L) + b_{AL} \text{Ln}(x_A)$

Keterangan: y_D : daya rosot CO_2 (g/cm^2), y_M : massa CO_2 terbentuk (g), x : nilai karakter stomata, a_n : nilai intersep, b : koefisien regresi, K : kerapatan stomata ($\text{stomata}/\text{mm}^2$), l : luas stomata (μm^2), a : luas daun sampel (cm^2); J : total jumlah stomata, L : total luas stomata (cm^2), dan A : luas daun total (cm^2).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Massa dan luas daun

Hasil pengamatan terhadap 19 jenis pohon menunjukkan variasi morfologi, massa dan luas daun (Gambar 1, Tabel 1 dan 2). Terdapat 9 jenis pohon yang memiliki daun tunggal dan 10 jenis berdaun majemuk (Tabel 1). Variasi daun majemuk terdiri dari 5 bentuk susunan daun dan 6 bentuk helaian daun. Total terdapat 11 variasi bentuk helaian daun. Berbagai variasi bentuk daun menghasilkan massa dan luas daun yang beragam (Tabel 2).

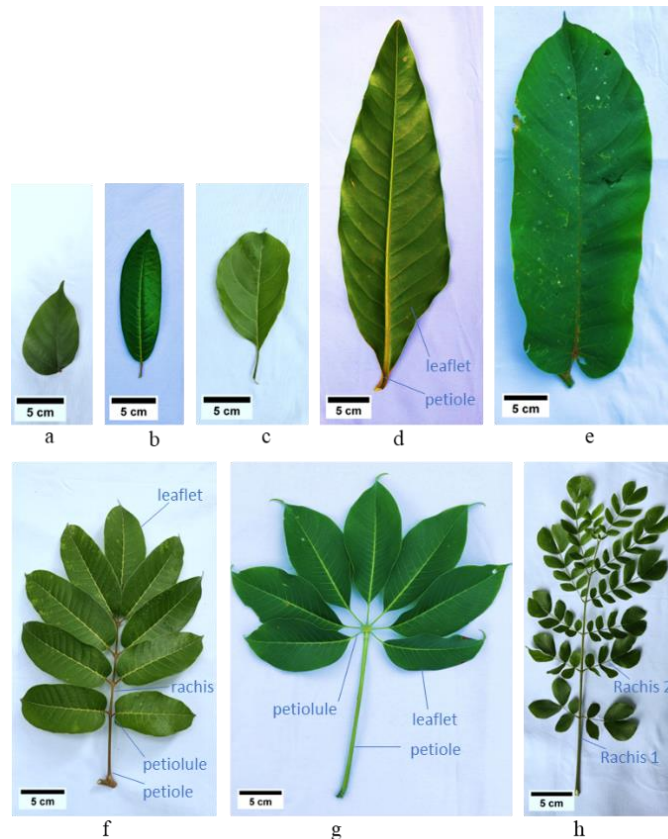
Hutan dataran rendah tropis memiliki variasi yang paling tinggi di antara tipe ekosistem lain di Indonesia (Widjaja et al. 2014). Kondisi ini menyebabkan tingginya variasi jenis tumbuhan, termasuk ragam morfologi daunnya. Morfologi daun terkait dengan ukuran, bentuk, warna, dan sifat daun merupakan bentuk adaptasi

tumbuhan terhadap berbagai kondisi lingkungannya (Prentice et al. 2011; Wang et al. 2022). Pada beberapa kasus, faktor cahaya mempengaruhi bentuk daun dan karakter stomata (Xu et al. 2009; Wang et al. 2021). Variasi morfologi daun akan mempengaruhi efektivitas penyerapan CO_2 selama proses fotosintesis berlangsung (Daud et al. 2021).

Pada penelitian ini, tipe daun tiap jenis pohon dibedakan oleh susunan daun, yaitu letak atau posisi anak daun pada tangkai daun (*petiole*) dan bentuk anak daun. Informasi ini penting untuk menentukan bagian daun mana yang menjadi parameter utama dalam menentukan efektivitas penyerapan CO_2 selama proses fotosintesis. Fotosintesis efektif terjadi hanya pada bagian yang mengandung kloroplas, organela yang bersifat mobil dan berwarna hijau karena mengandung klorofil (Finkeldey & Gailing 2013). Oleh karenanya, perhitungan massa daun dipilih pada lamina dan tangkai daun (pada daun tunggal)

dan anak daun dan tangkai anak daun (pada daun majemuk). Tangkai dan ibu tulang daun pada daun

majemuk dipisahkan karena secara umum sudah tidak mengandung kloroplas.



Gambar 1. Morfologi daun tunggal: (a) *Pterospermum javanicum*; (b) *Anisoptera marginata*; (c) *Terminalia bellirica*; (d) *Litsea garciae*; dan (e) *Castilla elastica*. Morfologi daun majemuk: (f) *Canarium vrieseanum*; (g) *Bombax anceps*; dan (h) *Samanea saman*

Tabel 1. Morfologi daun tumbuhan yang diteliti

No	Nama Jenis	Tipe Daun (susunan, bentuk)
1	<i>Terminalia bellirica</i> (Gaertn.) Roxb.	tunggal, bundar telur sungsang (<i>obovate</i>)
2	<i>Pterospermum javanicum</i> Jungh.	tunggal, bundar telur (<i>ovate</i>)
3	<i>Litsea garciae</i> Vidal	tunggal, lanset (<i>lanceolate</i>)
4	<i>Anisoptera marginata</i> Korth.	tunggal, bundar panjang (<i>elliptic</i>)
5	<i>Diospyros frutescens</i> Blume	tunggal, bundar panjang (<i>elliptic</i>)
6	<i>Canarium vrieseanum</i> Engl.	majemuk menyirip gasal (<i>imparipinnate</i>), panjang meruncing (<i>long-acuminate</i>)
7	<i>Castilla elastica</i> subsp. <i>costaricana</i> (Liebm.) C.C. Berg	tunggal, memanjang (<i>oblong</i>)
8	<i>Canarium vulgare</i> Leenh.	majemuk menyirip gasal (<i>imparipinnate</i>), panjang meruncing (<i>long-acuminate</i>)
9	<i>Cananga odorata</i> (Lam.) Hook.f. & Thomson	tunggal, runcing memanjang (<i>ovate-oblong</i>)
10	<i>Inocarpus fagifer</i> (Parkinson ex F.A.Zorn) Fosberg	tunggal, memanjang (<i>oblong</i>)
11	<i>Artocarpus altilis</i> (Parkinson) Fosberg	tunggal, tepian berlekuk (<i>lobate</i>)
12	<i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierre	majemuk menyirip gasal (<i>imparipinnate</i>), bundar telur-bundar panjang (<i>ovate-elliptic</i>)
13	<i>Pometia pinnata</i> J.R.Forst. & G.Forst.	majemuk bergantian (<i>alternate</i>), bundar panjang (<i>elliptic</i>)
14	<i>Intsia bijuga</i> (Colebr.) Kuntze	majemuk menyirip (<i>pinnate</i>), bundar telur (<i>ovate</i>)
15	<i>Ormosia calavensis</i> Azaola ex Blanco	majemuk menyirip gasal (<i>imparipinnate</i>), bundar panjang (<i>elliptic</i>)
16	<i>Canarium decumanum</i> Gaertn.	majemuk menyirip gasal (<i>imparipinnate</i>), bundar telur-bundar memanjang (<i>ovate-elliptic</i>)
17	<i>Bombax anceps</i> Pierre	majemuk menjari (<i>palmate</i>), bundar telur sungsang-bundar panjang (<i>obovate-elliptic</i>)
18	<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.	majemuk ganda (<i>bipinnate</i>), bundar telur (<i>ovate</i>)
19	<i>Cassia grandis</i> L.f.	majemuk menyirip (<i>pinnate</i>), bundar panjang-memanjang (<i>elliptic-oblong</i>)

Daya rosot karbon dioksida

Massa karbohidrat yang dihasilkan oleh suatu tanaman menunjukkan adanya penyerapan karbon dioksida pada tanaman. Semakin besar karbohidrat yang dihasilkan, maka penyerapan karbon dioksida juga semakin besar. Massa karbohidrat yang dihasilkan oleh 19 jenis pohon pada saat pengukuran pukul 06.00 lebih rendah dibandingkan dengan pengukuran pukul 10.00.

Hal ini disebabkan terjadi proses fotosintesis yang membentuk senyawa organik (karbohidrat) secara kontinu seiring dengan semakin tingginya intensitas cahaya yang diterima dan penyerapan karbon dioksida pada pukul 10.00. Hasil penghitungan massa karbohidrat dan massa karbon dioksida pada tiap-tiap jenis pohon disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran nilai serapan karbon

No	Jenis	%KH		Massa KH (g)	CO ₂ / sampel (g/jam)	Daya rosot CO ₂ (g/jam)	
		06.00	10.00			T ₁	T ₂
1	<i>Terminalia bellirica</i> (Gaertn.) Roxb.	58,60	62,78	0,0170	0,0062	9,87 ± 2,72 ^{ab}	130,17 ± 82,15 ^a
2	<i>Pterospermum javanicum</i> Jungh.	58,85	68,21	0,0380	0,0140	12,15 ± 6,86 ^a	61,77 ± 55,29 ^b
3	<i>Litsea garciae</i> Vidal	58,90	59,96	0,0043	0,0016	4,79 ± 3,29 ^{cd}	59,78 ± 35,42 ^b
4	<i>Anisoptera marginata</i> Korth.	49,50	53,29	0,0154	0,0057	5,67 ± 3,83 ^{bc}	54,75 ± 47,39 ^b
5	<i>Diospyros frutescens</i> Blume	49,50	53,29	0,0154	0,0057	10,37 ± 6,00 ^a	44,64 ± 32,5 ^b
6	<i>Canarium vrieseanum</i> Engl.	54,45	55,94	0,0061	0,0022	3,43 ± 3,24 ^{cd}	29,69 ± 31,27 ^b
7	<i>Castilla elastica</i> subsp. <i>costaricana</i> (Liebm.) C.C.Berg	64,30	66,23	0,0078	0,0029	3,15 ± 1,01 ^{cd}	22,46 ± 8,44 ^b
8	<i>Canarium vulgare</i> Leenh.	54,60	56,09	0,0061	0,0022	2,09 ± 1,53 ^{cd}	16,50 ± 20,46 ^b
9	<i>Cananga odorata</i> (Lam.) Hook.f. & Thomson	60,20	60,66	0,0019	0,0007	0,90 ± 0,60 ^{cd}	14,03 ± 10,15 ^b
10	<i>Inocarpus fagifer</i> (Parkinson ex F.A.Zorn) Fosberg	68,45	69,54	0,0044	0,0016	1,50 ± 0,68 ^{cd}	10,50 ± 7,78 ^b
11	<i>Artocarpus altilis</i> (Parkinson) Fosberg	76,45	77,16	0,0029	0,0011	1,12 ± 0,63 ^{cd}	6,37 ± 6,15 ^b
12	<i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierre	35,00	42,12	0,0289	0,0106	3,09 ± 1,57 ^{cd}	3,23 ± 1,09 ^b
13	<i>Pometia pinnata</i> J.R.Forst. & G.Forst.	75,20	75,59	0,0016	0,0006	0,24 ± 0,15 ^d	2,68 ± 2,45 ^b
14	<i>Intsia bijuga</i> (Colebr.) Kuntze	61,10	61,33	0,0009	0,0003	0,61 ± 0,70 ^{cd}	2,55 ± 1,58 ^b
15	<i>Ormosia calavensis</i> Azaola ex Blanco	76,45	77,16	0,0029	0,0011	0,39 ± 0,34 ^d	1,60 ± 1,45 ^b
16	<i>Canarium decumanum</i> Gaertn.	64,75	64,98	0,0009	0,0003	0,02 ± 0,01 ^d	0,50 ± 0,16 ^b
17	<i>Bombax anceps</i> Pierre	61,20	63,53	0,0095	0,0035	0,98 ± 0,17 ^{cd}	
18	<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.	64,35	67,16	0,0114	0,0042	0,16 ± 0,07 ^d	
19	<i>Cassia grandis</i> L.f.	62,15	63,16	0,0041	0,0015	0,04 ± 0,01 ^d	

Keterangan: KH: Karbohidrat; T₁: pohon umur 4 tahun; T₂: pohon umur 8 tahun; berat sampel rata-rata 2.46 g. Nilai daya rosot adalah rata-rata dan standar deviasi (Mean ± SD), nilai yang diikuti oleh huruf superskrip yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang signifikan pada P<0.05. Pada T₂, *Bombax anceps*, *Samanea saman*, dan *Cassia grandis* tidak tersisa karena mati

Hasil pengukuran daya rosot CO₂ per satuan massa daun berturut-turut dari yang tertinggi adalah *Pterospermum javanicum* (0,014 g/jam), *Pongamia pinnata* (0,011 g/jam), dan *Terminalia bellirica* (0,006 g/jam) (Tabel 2). Perhitungan daya rosot CO₂ menunjukkan bahwa *Terminalia bellirica* (130,17 g/jam) merupakan jenis pohon dengan daya rosot tertinggi, diikuti *Pterospermum javanicum* (61,77 g/jam), *Litsea garciae* (59,78 g/jam), *Anisoptera marginata* (54,75 g/jam), dan *Diospyros frutescens* (44,64 g/jam). Lima jenis tersebut memiliki daya rosot CO₂ yang jauh melebihi *Castilla elastica* (22,46 g/jam). *Litsea garciae* mengalami kelonjakan nilai massa daun yang sangat tinggi setelah umur 8 tahun sehingga memiliki nilai massa daun tertinggi. Akan tetapi, nilai serapan karbon yang lebih kecil menyebabkan daya rosot totalnya masih di bawah *Terminalia bellirica* dan *Pterospermum javanicum*.

Pada umur 8 tahun, *Bombax anceps*, *Samanea saman*, dan *Cassia grandis* tidak tersisa karena mati. Pada umur 4 tahun ketiga jenis ini masih tumbuh dengan rata-rata massa daun total yang kecil (masuk kategori d pada hasil uji beda rata-rata *Duncan Test*) (Tabel 2). Massa daun total yang kecil menunjukkan ukuran pohon yang kecil juga. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga jenis ini tidak mampu beradaptasi dengan baik pada kondisi lingkungan dan kompetisi antar individu selama pertumbuhan di demplot.

Penentuan kapasitas penyerapan karbon dioksida pada penelitian ini menggunakan pendekatan yang berbeda dengan beberapa penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Purwaningsih (2007), Sukmawati et al. (2015), Daud et al. (2019), dan Purnomo et al. (2022). Dalam penelitian ini dilakukan analisis karbohidrat dalam daun pada beberapa jenis yang terkontrol umur dan lokasi tumbuhnya. Penghitungan karbon dioksida berdasarkan

analisis karbohidrat memiliki kelebihan dibandingkan metode pengukuran menggunakan alat. Pengukuran serapan karbon dioksida (CO₂) menggunakan alat pengukur fotosintesis bersifat *instantaneous* dan tidak mempertimbangkan hilangnya karbon dari respirasi (Hidayati et al. 2013). Analisis karbohidrat menunjukkan kandungan karbon yang tersisa selama proses fotosintesis dan respirasi berlangsung di dalam daun. Keunggulan lain dari penelitian ini adalah faktor umur dan tempat tumbuh yang terkontrol akan menjamin validitas perbandingan kemampuan serapan karbon dioksida antar jenis. Faktor umur tanaman dan daun sangat krusial dalam menentukan efektivitas fotosintesis (Bielczynski et al. 2017; Bauerle et al. 2020).

Pengukuran serapan karbon dioksida menggunakan alat pengukur fotosintesis terhadap beberapa jenis yang sama mendapatkan hasil yang berbeda dengan penelitian ini. *Pometia pinnata* memiliki nilai serapan CO₂ tiap daun tertinggi, mengalahkan *Pterospermum javanicum* dan *Intsia bijuga* (Hidayati et al. 2013). Penelitian ini menghasilkan nilai serapan CO₂ tertinggi pada daun *Pterospermum javanicum*. Perbedaan hasil ini mengindikasikan bahwa selama proses fotosintesis, *Pterospermum javanicum* melakukan respirasi dengan mengeluarkan karbon lebih tinggi dibandingkan *Pometia pinnata*. Faktor lain yang bisa mempengaruhi perbedaan hasil tersebut adalah perbedaan umur atau kondisi habitat yang berbeda di antara pohon-pohon tersebut. Jenis-jenis pohon yang berada pada umur ideal dan didukung kondisi habitat yang sesuai jelas akan mendukung performa organ tumbuhan dalam melakukan fotosintesis (Bielczynski et al. 2017).

Pada penelitian analisis karbohidrat lain, dapat dibandingkan nilai serapan CO₂ per sampel (gram daun) dan per pohon (individu) menghasilkan nilai yang bervariasi. Pada kasus pohon-pohon terpilih di KR Bogor, daya serap CO₂ tiap sampel daun *Cananga odorata* adalah yang tertinggi dengan $29,1 \times 10^{-4}$ g/cm²/4 jam jauh lebih tinggi dari *Cassia grandis* ($11,7 \times 10^{-4}$ g/cm²/4jam) dan *Samanea saman* ($7,78 \times 10^{-4}$ g/cm²/4 jam) (Purwaningsih 2007). Setelah dikonversi ke satuan pohon, nilai serapan CO₂ tertinggi pada *Samanea saman* adalah 66,3 g/jam, diikuti *Cananga odorata* 22,6 g/jam, *Pometia pinnata* 7,18 g/jam, dan *Cassia grandis* 2,75 g/jam. Terlihat jelas perbedaan faktor pengali (jumlah daun total) pada jenis *Samanea saman* yang superior dibandingkan jenis lain. Pada kondisi ini, faktor umur pohon sangat jelas menjadi faktor pembeda. Pada penelitian ini, dengan umur 4 tahun dan kondisi habitat yang sama, *Cananga odorata* memiliki daya rosot CO₂ 0,90 g/jam dibandingkan *Samanea saman* 0,16 g/jam, *Pometia pinnata* 0,24 g/jam, dan *Cassia grandis* 0,04 g/jam. Bahkan pada umur 8

tahun, daya rosot CO₂ *Cananga odorata* menjadi 14,03 g/jam (Tabel 2).

Tahap yang paling penting di dalam perhitungan daya rosot CO₂ adalah saat sampel daun dikonversi ke dalam satuan pohon. Beberapa penelitian terdahulu menggunakan perhitungan jumlah total daun untuk mengonversi luas daun total (Dahlan 2008; Lailati 2013; Daud et al. 2019). Cara konversi dengan jumlah daun total per pohon memungkinkan terjadi kesalahan hitung karena struktur cabang dan ranting daun tidak seragam pada tiap pohon. Sebagai solusi, penelitian ini menggunakan massa daun total untuk mengkonversi daya rosot CO₂ pada tiap individu pohon. Massa daun berkorelasi positif dengan luas daun yang menunjukkan seberapa besar bidang luas daun yang efektif melakukan fotosintesis (Pan et al. 2013; Yu et al. 2019). Tingkat kesulitan penghitungan massa daun yang dikumpulkan dari bagian-bagian yang dipilih (bagian yang masih mengandung klorofil) tentu lebih mudah dan akurat dilakukan daripada menghitung jumlah daun total. Bahkan massa daun lebih mempengaruhi perbedaan distribusi biomassa di atas permukaan tanah daripada luas daun (Duursma & Falster 2016).

Karakter stomata dan daya rosot karbon dioksida per satuan luas daun

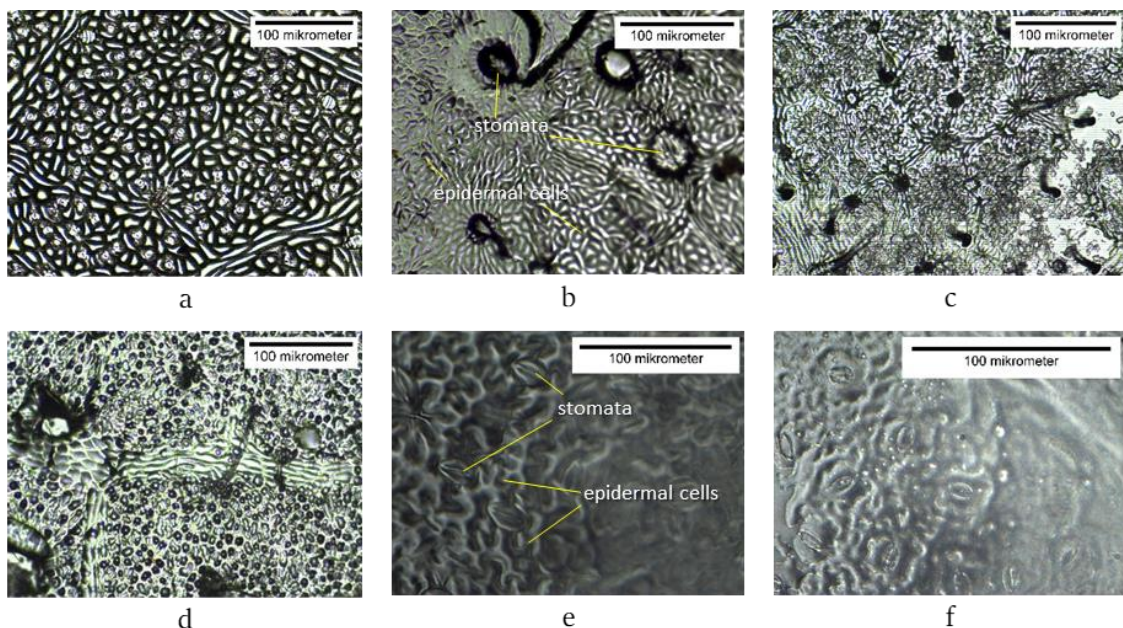
Luas stomata tertinggi ditunjukkan oleh *Castilla elastica* ($1475,53 \mu\text{m}^2$) dan *Canarium decumanum* ($1218,91 \mu\text{m}^2$) (Tabel 3). Kerapatan stomata terbesar diperlihatkan oleh *Pometia pinnata* (590,70 stomata/mm²), diikuti *Artocarpus altilis* (481,60 stomata/mm²), dan *Intsia bijuga* (371,30 stomata/mm²). Luas stomata yang dihitung menggunakan rumus menjadi variabel yang mewakili sekaligus panjang dan lebar stomata. Kerapatan stomata menunjukkan banyaknya stomata yang tampak pada luasan bidang pandang mikroskop (Gambar 3).

Secara umum stomata dari 19 jenis pohon tersebut berbentuk ginjal (*kidney-shape*) (Gambar 2) yang menjadi penciri tumbuhan dikotil (Harrison et al. 2019). Bentuk sel pelindung (*guard cells*) pada stomata yang lebih tipis lebih responsif dalam menerima cahaya matahari sehingga lebih efektif dalam pertukaran gas (Harrison et al. 2019; Franks 2006). Luas dan kerapatan stomata merupakan ukuran kemampuan konduktansi yang saling berkaitan dalam mempengaruhi efektivitas fotosintesis. Luas stomata sering kali berbanding terbalik dengan kerapatannya (Harrison et al. 2019). Hal ini terbukti pada *Castilla elastica* dan *Canarium decumanum* yang memiliki luas stomata yang tertinggi, tetapi kerapatannya rendah sehingga memiliki daya rosot yang rendah juga. Berlaku juga sebaliknya pada jenis *Pometia pinnata*, *Artocarpus altilis*, dan *Intsia bijuga*. Jenis dengan luas dan kerapatan

stomata yang ideal seperti *Pterocarpus indicus* memiliki nilai daya rosot yang tertinggi ($0,0006377 \text{ g/cm}^2$).

Tabel 3. Hasil pengamatan karakter stomata

No	Nama Jenis	Stomata			Daya Rosot $\text{CO}_2 (\times 10^{-3} \text{ g/cm}^2)$	
		Panjang (μm)	Lebar (μm)	Kerapatan (stomata/ mm^2)		
1	<i>Terminalia bellirica</i> (Gaertn.) Roxb.	23,79	15,48	302,64	115,29	0,1847
2	<i>Pterospermum javanicum</i> Jungh.	15,15	11,62	140,64	132,92	0,6377
3	<i>Litsea garciae</i> Vidal	13,02	8,63	91,99	41,71	0,0589
4	<i>Anisoptera marginata</i> Korth.	24,29	20,53	394,23	16,35	0,1569
5	<i>Diospyros frutescens</i> Blume	19,83	14,47	230,89	174,87	0,1356
6	<i>Canarium vrieseanum</i> Engl.	13,22	8,87	95,76	253,98	0,0487
7	<i>Castilla elastica</i> subsp. <i>costaricana</i> (Liebm.) C.C.Berg	44,41	42,3	1475,53	9,15	0,0688
8	<i>Canarium vulgare</i> Leenh.	13,31	9,4	101,21	333,95	0,0407
9	<i>Cananga odorata</i> (Lam.) Hook.f. & Thomson	20,78	15,53	258,74	276,49	0,0175
10	<i>Inocarpus fagifer</i> (Parkinson ex F.A.Zorn) Fosberg	17,1	15,76	211,91	357,52	0,0451
11	<i>Artocarpus altilis</i> (Parkinson) Fosberg	18,72	10,74	170,32	481,60	0,0222
12	<i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierre	14,57	10,06	119,05	167,01	0,2239
13	<i>Pometia pinnata</i> J.R.Forst. & G.Forst.	11,7	9,29	86,46	590,70	0,0239
14	<i>Intsia bijuga</i> (Colebr.) Kuntze	21,54	21,44	362,53	371,30	0,0104
15	<i>Ormosia calavensis</i> Azaola ex Blanco	20,72	12,04	210,62	85,20	0,0221
16	<i>Canarium decumanum</i> Gaertn.	41,46	37,35	1218,91	7,33	0,0090
17	<i>Bombax anceps</i> Pierre	21,88	14,79	263,90	179,31	0,0648
18	<i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr.	19,21	12,51	197,46	186,38	0,0801
19	<i>Cassia grandis</i> L.f.	21,45	15,74	271,43	206,92	0,0599



Gambar 2. Bentuk dan sebaran stomata beberapa jenis pohon: (a) *Bombax anceps*, (b) *Castilla elastica*, (c) *Artocarpus altilis*, (d) *Samanea saman*, (e) *Terminalia bellirica*, dan (f) *Litsea garciae*

Kerapatan stomata sangat dipengaruhi oleh kondisi ekologis dan fisiologis tanaman, seperti ekspansi sel, tingkat kelembaban, dan ukuran sel (Steinhorsdottir et al. 2013). Stomata merupakan tempat pertukaran karbon dioksida yang diserap dari udara untuk fotosintesis serta oksigen dan uap air yang akan dikeluarkan secara bersama melalui difusi. Kepekaan konduktansi stomata dalam menjalankan fungsi tersebut merupakan parameter

penting tanaman untuk beradaptasi dengan lingkungan sekitarnya (Lawson & Blatt 2014; Harisson et al. 2019).

Stomata terdapat pada kedua permukaan daun, namun kemungkinan terjadi fotosintesis hanya pada permukaan bagian bawah (*abaxial surface*) (Sutrian 1992). Stomata akan efektif menjadi tempat masuknya CO_2 jika dalam keadaan terbuka. Pembukaan stomata dipengaruhi oleh penurunan konsentrasi CO_2 dalam daun,

meningkatnya intensitas cahaya, peningkatan suhu, peningkatan potensial air daun, menurunnya kecepatan angin, dan tingginya laju fotosintesis (Goldsworthy & Fisher 1992). Pembukaan stomata yang efektif terjadi pada saat pencahayaan matahari mulai optimal, sehingga pengambilan sampel dilakukan sekitar pukul 09.00.

Daya rosot per satuan luas dihitung dengan membagi massa CO₂ yang terbentuk selama proses fotosintesis pada luasan sampel daun, kemudian dikalikan dengan luas daun total (satu pohon). Luas daun total dihitung dari massa daun total dikalikan dengan rasio luas per massa daun sampel (Tabel 3). Daya rosot CO₂ per satuan luas digunakan untuk menentukan korelasi dengan variabel luas, kerapatan, dan luas daun total.

Hubungan karakter stomata dengan serapan karbon dioksida

Hubungan daya rosot CO₂ dengan karakter stomata (Eq.1-Eq.6) terlihat tidak ada korelasi karena nilai

koefisien determinasi (R²) jauh di bawah 60% dengan tingkat signifikansi P>0.05 (Tabel 4). Sementara, massa CO₂ memiliki korelasi linier dengan masing-masing variabel total jumlah stomata, luas stomata, jumlah daun total, dan variabel ganda kombinasi dari ketiga variabel tersebut (Eq.7-Eq.12, P<0.005). Namun, model dengan variabel jumlah stomata Ln(x₁) (Eq.7), total luas stomata Ln(x_L) (Eq.8), dan variabel ganda dari keduanya (Eq.10) memiliki nilai R² di bawah 60%, sehingga ketiga model ini memiliki korelasi yang lemah terhadap massa CO₂Ln(y_M). Model regresi dengan variabel total luas daun Ln(x_A) (Eq.9), variabel kombinasi jumlah stomata Ln(x₁) dan total luas daun Ln(x_A) (Eq.11), dan variabel kombinasi total luas stomata Ln(x_L) dan total luas daun Ln(x_A) (Eq.12) dapat menjelaskan korelasi antar variabel dengan cukup baik. Variabel bebas pada 3 model regresi tersebut (Eq.9, Eq.11 dan Eq.12) dapat menjelaskan lebih dari 60% nilai massa CO₂.

Tabel 4. Hasil analisis regresi hubungan karakter stomata, luas daun dan daya serap CO₂

Kode	Persamaan	R	R ²	Sig.
Daya Rosot CO ₂ (g/cm ²) per sampel				
Eq.1	$\text{Ln}(y_D) = -9,460 - 0,071\text{Ln}(x_K)$	0,616	0,046	0,379
Eq.2	$\text{Ln}(y_D) = -8,176 - 0,300\text{Ln}(x_1)$	0,856	0,007	0,732
Eq.3	$\text{Ln}(y_D) = -6,202 - 0,717\text{Ln}(x_a)$	0,183	0,033	0,454
Eq.4	$\text{Ln}(y_D) = -3,780 - 0,394\text{Ln}(x_K) - 0,758\text{Ln}(x_1)$	0,511	0,155	0,261
Eq.5	$\text{Ln}(y_D) = -5,302 - 0,003\text{Ln}(x_K) - 0,790\text{Ln}(x_a)$	0,419	0,176	0,213
Eq.6	$\text{Ln}(y_D) = -6,276 - 0,001\text{Ln}(x_1) - 0,662\text{Ln}(x_a)$	0,281	0,079	0,519
Massa CO ₂ (g) per pohon				
Eq.7	$\text{Ln}(y_M) = -10,713 + 0,593\text{Ln}(x_1)$	0,642	0,412	0,000
Eq.8	$\text{Ln}(y_M) = -3,726 + 0,683\text{Ln}(x_L)$	0,649	0,421	0,000
Eq.9	$\text{Ln}(y_M) = -9,746 + 0,993\text{Ln}(x_A)$	0,835	0,698	0,000
Eq.10	$\text{Ln}(y_M) = -6,925 + 0,256\text{Ln}(x_1) + 0,411\text{Ln}(x_L)$	0,657	0,431	0,000
Eq.11	$\text{Ln}(y_M) = -9,057 - 0,076\text{Ln}(x_1) + 1,072\text{Ln}(x_A)$	0,837	0,700	0,000
Eq.12	$\text{Ln}(y_M) = -11,020 - 0,370\text{Ln}(x_L) + 1,359\text{Ln}(x_A)$	0,853	0,727	0,000

Keterangan: y_D: daya rosot CO₂ (g/cm²), y_M: massa CO₂(g), x_K: kerapatan stomata (stomata/mm²), x₁: luas stomata (μm²), x_a: luas daun sampel (cm²); x₁: total jumlah stomata, x_L: total luas stomata (cm²), x_A: total luas daun (cm²), R²: koefisien determinasi, R: koefisien korelasi

Tabel 5. Uji normalitas residual dan multi kolinearitas model regresi

Kode	Persamaan	Tes normalitas residual		Tes multikolinearitas		
		NPKS	Sig.	CC	T	VIF
Eq.9	$\text{Ln}(y) = -9,746 + 0,993\text{Ln}(x)$	0,110	0,200	-	-	-
Eq.11	$\text{Ln}(y) = -9,057 - 0,076\text{Ln}(x_1) + 1,072\text{Ln}(x_2)$	0,119	0,200	0,875	0,234	4,278
Eq.12	$\text{Ln}(y) = -11,020 - 0,370\text{Ln}(x_1) + 1,359\text{Ln}(x_2)$	0,070	0,200	0,803	0,355	2,815

Keterangan: NPKS: Tes non-parametrikKolmogorov-Smirnov, Sig.: nilai signifikansi pada P<0.05, CC: koefisien korelasi, T: Toleransi, VIF: faktor invasi varian

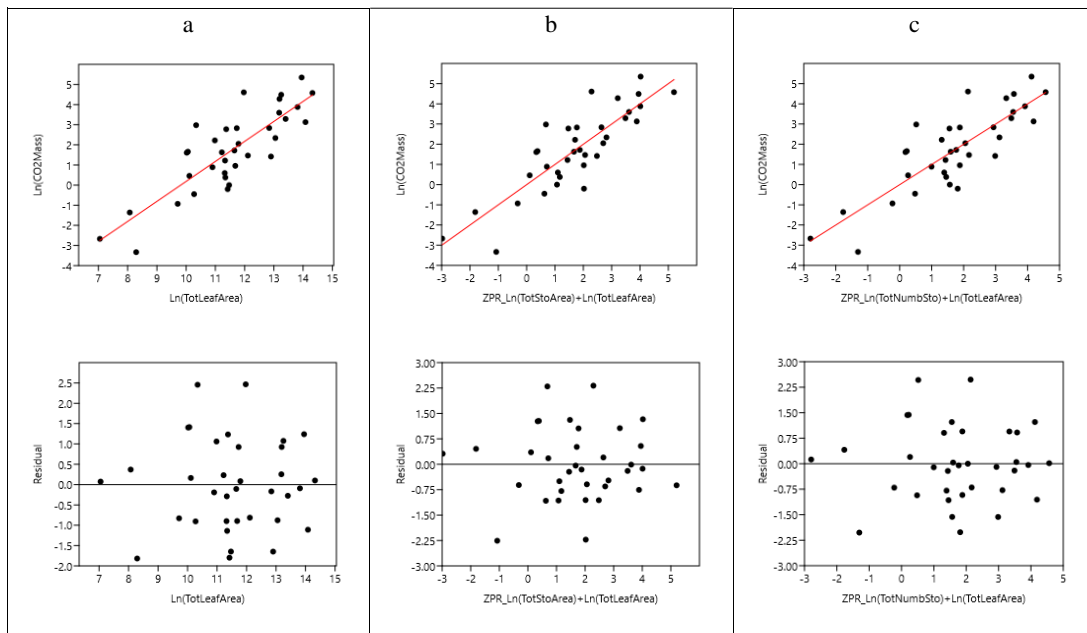
Pada uji normalitas model regresi Eq.9, Eq.11 dan Eq.12, terlihat bahwa residual terdistribusi normal (semua P=0,200>0,05) (Tabel 5). Sementara untuk model dengan variabel ganda Eq.11 dan Eq.12, tidak terjadi korelasi serius antar variabel karena masing-masing nilai korelasi hanya 0,875 dan 0,803 (<95%). Hal ini didukung nilai toleransi 0,234 dan 0,355 (>0.10) dan *varians inflationfactor* (VIF) 4,278 dan 1,815 (<10). Grafik korelasi

dan residual pada model regresi Eq.9, Eq.11 dan Eq.12 menunjukkan pola linearitas yang cukup baik dan tidak terjadi heteroskedastisitas (Gambar 3). Model regresi yang terbentuk memiliki kesamaan varians dari residual pada suatu pengamatan ke pengamatan lainnya.

Tidak adanya korelasi yang signifikan antara daya rosot CO₂ dengan karakter stomata dan luas daun sampel pada penelitian ini sejalan dengan temuan Purwaningsih

(2007) dan Lailati (2013). Hal ini menegaskan bahwa karakter stomata, pada tanaman yang terkontrol umur dan faktor ekologisnya, juga tidak memiliki pengaruh terhadap daya rosot CO₂. Karakter stomata yang diwakili luas dan kerapatan stomata sangat relatif karena mengalami konduktansi secara dinamis, tergantung pada pola adaptasi dengan kondisi lingkungan (Lawson & Blatt 2014; Harisson et al. 2019). Luas stomata (x_1) memiliki nilai R² paling kecil (0,07) yang menunjukkan hampir tidak ada korelasi dengan daya rosot CO₂. Keadaan ini semakin menguatkan dugaan bahwa besar kecilnya ukuran

stomata tidak ada hubungannya dengan daya rosot CO₂ pada saat observasi dilakukan. Kajian kepekaan konduktansi stomata sangat diperlukan untuk mengetahui seberapa efektif penyerapan CO₂ dalam daun. Konduktansi stomata berkorelasi positif dengan proses transpirasi dan penyerapan CO₂ (Hidayati et al. 2013; Davis & Hidayati 2020). Temuan terbaru oleh Purcell et al. (2018) bahwa konduktansi stomata menurun sebagai bentuk respons dari kenaikan CO₂ di atmosfer.



Gambar 3. Grafik korelasi dan residual antara Ln (Massa CO₂) dengan: (a) Ln (Luas Daun Total) (Eq.9); (b) Ln (Luas Stomata + Luas Daun Total) (Eq.11); dan (c) Ln (Jumlah Stomata + Luas Daun Total) (Eq.12)

Massa CO₂ yang terbentuk selama proses fotosintesis memiliki korelasi cukup kuat dengan total luas daun (x_A). Penambahan luas daun sebesar 1% akan menaikkan massa CO₂ sebesar 0,993%. Hasil ini mendukung temuan sebelumnya, bahwa terdapat korelasi positif antara luas daun dengan kemampuan penyerapan CO₂ (Daud et al. 2019; Lailati 2013). Total jumlah stomata (x_1) dan total luas stomata (x_L) berkorelasi positif terhadap massa CO₂ baik sebagai variabel tunggal maupun kombinasi keduanya. Namun, kedua variabel tersebut menjadi berkorelasi negatif ketika dikombinasikan dengan luas daun total (x_A). Pada saat total luas daun stabil, kenaikan 1% total jumlah stomata dan total luas stomata akan menyebabkan penurunan massa CO₂ sebesar masing-masing 0,076% dan 0,370%. Mekanisme penurunan ukuran stomata merupakan proses yang rumit dan sangat tergantung pada faktor lingkungan, seperti intensitas cahaya (Harisson et al. 2019). Ketika massa CO₂ dalam daun meningkat selama fotosintesis berlangsung, maka ukuran stomata akan menyusut karena menutup. Hal ini sesuai temuan Goldsworthy & Fisher (1992), bahwa kenaikan ukuran stomata terjadi karena

penurunan konsentrasi CO₂ dalam daun, peningkatan intensitas cahaya, peningkatan suhu, peningkatan potensial air daun, menurunnya kecepatan angin, dan tingginya laju fotosintesis. Korelasi negatif ukuran stomata terhadap massa CO₂ yang terbentuk kemungkinan juga akibat proses konduktansi stomata yang merespons negatif dari kenaikan CO₂ di atmosfer (Purcell et al. 2018). Pada saat CO₂ melimpah di atmosfer, stomata menutup sehingga ukuran (total jumlah dan luas stomata) akan berkurang dan berlaku sebaliknya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Terdapat 6 jenis pohon asli yang memiliki potensi tinggi dalam penyerapan CO₂, antara lain: *Terminalia bellirica* (130,17 g/jam), *Pteospermum javanicum* (61,77 g/jam), *Litsea garciae* (59,78 g/jam), *Anisoptera marginata* (54,75 g/jam), *Diospyros frutescens* (44,64 g/jam), dan *Canarium vrieseanum* (29,69 g/jam) memiliki potensi sekuestrasi karbon lebih besar dari jenis introduksi *Castilla elastica* (22,46 g/jam) dan jenis asli lainnya. Luas stomata, kerapatan stomata dan luas daun

sampel tidak berkorelasi terhadap daya rosot CO₂. Pada skala pohon, total jumlah stomata, total luas stomata, dan total luas daun memiliki pengaruh yang signifikan ($P < 0,005$) dan bervariasi terhadap penambahan massa CO₂ selama fotosintesis berlangsung. Pengaruh kuat terhadap massa CO₂ terjadi pada variabel total luas daun ($R^2 = 0,698$), kombinasi total jumlah stomata dan total luas daun ($R^2 = 0,700$), dan kombinasi jumlah total stomata dan total luas daun ($R^2 = 0,727$).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Kepala Pusat Konservasi Tumbuhan Kebun Raya – LIPI (periode 2015 - 2019) dan Kepala Pusat Riset Konservasi Tumbuhan, Kebun Raya, dan Kehutanan-BRIN dan Direktur Pengelolaan Koleksi Ilmiah-BRIN beserta jajaran yang telah mendukung penelitian ini, Kepala Stasiun Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Bogor, staf Laboratorium Pasca Panen Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pasca Panen Kementerian Pertanian, dan seluruh kolega yang turut mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bauerle WL, McCullough C, Iversen M, Hazlett M. 2020. Leaf age and position effects on quantum yield and photosynthetic capacity in Hemp Crowns. *Plants* 9: 271. DOI: 10.3390/plants9020271.
- Bielczynski LW, Łacki MK, Hoefnagels I, Gambin A, Croce R. 2017. Leaf and plant age affects photosynthetic performance and photo protective capacity. *Plant Physiology* 175(4): 1634–1648. DOI: 10.1104/pp.17.00904.
- ClimateWatch. 2022. Global historical emissions. World Resources Institute, Washington DC. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions> (diakses 20 Januari 2022)
- Dahlan EN. 2008. Jumlah emisi gas CO₂ dan pemilihan jenis tanaman berdaya rosot sangat tinggi: studi kasus di Kota Bogor. *Media Konservasi* 13(2): 85–89.
- Daud M, Bustam BM, Arifin B. 2019. A comparative study of carbondioxide absorption capacity of seven urban forest plant species of Banda Aceh, Indonesia. *Biodiversitas* 20(11): 3372–3379. DOI: 10.13057/biodiv/d201134.
- Daud M, Bustam BM, Harnelly E, Dharma W. 2021. Carbon absorption capability of single-leaf and compound-leaf plants in the BNI urban forest, Banda Aceh. The 2nd ISATrop2021 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 918: 012027. DOI: 10.1088/1755-1315/918/1/012027.
- Davis LOMM, Hidayati N. 2020. Carbondioxide absorption and physiological characteristics of selected tropical low land tree species for revegetation. The 7th Symposium of JAPAN-ASEAN Science Technology Innovation Platform (JASTIP) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 591: 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/591/1/012039.
- Duchicela J, Vogelsang KM, Schultz PA, Kaonongbua W, Middleton EL, Bever JD. 2012. Non-native plants and soil microbes: potential contributors to the consistent reduction in soil aggregate stability caused by the disturbance of North American grasslands. *New Phytologist* 196(1): 212–222.
- Duursma RA, Falster DS. 2016. Leafmass per area, not total leaf area, drives differences in above-ground biomass distribution among woody plant functional types. *New Phytologist* 212(2): 368–376. DOI: 10.1111/nph.14033.
- Fanindi A, Prawiradiputra BR, Abdullah L. 2010. Pengaruh intensitas cahaya terhadap produksi hijauan dan benih kalopo (*Calopogonium mucunoides*). *Jurnal Ilmu Ternak dan Veteriner* 15(3): 205–214.
- FAO. 2003. Chapter 2: Methods of Food Analysis. In: FAO Food and Nutrition Paper 77. Food Energy - Methods of Analysis and Conversion Factors. Report of a Technical Workshop, Rome, 3-6 December 2002. Food And Agriculture Organization of The United Nations, Rome. <https://www.fao.org/3/Y5022E/y5022e03.htm#bm3.3> (diakses 20 Januari 2022).
- Finkeldey R, Gailing O. 2013. Chloroplasts. *Brenner's Encyclopedia of Genetics*. DOI: 10.1016/b978-0-12-374984-0.00231-x.
- Franks PJ. 2006. Higher rates of leaf gas exchange are associated with higher leaf hydrodynamic pressure gradients. *Plant, Cell & Environment* 29: 584–592. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2005.01434.x.
- Goldsworthy PR, Fisher NM. 1992. Fisiologi Tanaman Budidaya Tropik (Terjemahan). Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Harrison E, Cubas L, Gray J, Hepworth C. 2019. The influence of stomatal morphology and distribution on photosynthetic gas exchange. *The Plant Journal* 101(4): 768-779. DOI: 10.1111/tpj.14560.
- Hidayati NM, Mansur M, Juhaeti T. 2013. Variasi serapan karbon dioksida (CO₂) jenis-jenis pohon di "Ecopark", Cibinong dan kaitannya dengan potensi mitigasi gas rumah kaca. *Buletin Kebun Raya* 16(1): 38–50. DOI: 10.14203/bkr.v16i1.26.
- Indrajaya Y, Yuwati TW, Lestari S, Winarno B, Narendra B, Yudono H, Nugroho S, Rachmanadi D, Pratiwi, Turjaman M, Nugroho R, Savitri E, Putra PB, Santosa P, Nugroho N, Cahyono S, Wahyuningtyas R, Prayudyaningsih R, Halwany W, Stavi I, 2022.

- Tropical forest landscape restoration in Indonesia: A review. *Land* 11: 328. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11030328>.
- Kementerian Lingkungan Hidup (KLHK). 2010. Laju Kerusakan Hutan Masih Tinggi Upaya Pemulihan Belum Seimbang. <http://www.menlh.go.id> (diakses 30 Juni 2010).
- Lailati M. 2013. Kemampuan rosot karbon dioksida 15 jenis tanaman koleksi Kebun Raya Bogor. *Widyariset* 16(2): 277–286.
- Lal R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management Journal* 220: 42–258. DOI: 10.1016/j.foreCO2005.08.015.
- Lawson T, Blatt MR. 2014. Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency. *Plant Physiology* 164(4): 1556–1570. DOI: 10.1104/pp.114.237107.
- Ong PS. 2012. Mainstreaming native species-based forest restoration: A synthesis-the need to change MAPS (Mindsets, Attitudes, and Practices). pp. 49–50. *In*: Neidel JD, Consunji H, Labozetta J, Calle A, MateoVega J (eds). *Mainstreaming native species-based forest restoration: ELTI Conference Proceedings*. Yale University; Panama City: Smithsonian Tropical Research Institute, New Haven, CT.
- Pan S, Liu C, Zhang W, Xu S, Wang N, Li Y, Gao J, Wang Y, Wang G. 2013. The scaling relationships between leaf mass and leaf area of vascular plant species change with altitude. *PLoS ONE* 8(10): e76872. DOI: 10.1371/journal.pone.0076872.
- Pertamawati. 2010. Pengaruh fotosintesis terhadap pertumbuhan tanaman kentang (*Solanum tuberosum* L.) dalam lingkungan fotoautotrof secara invitro. *Sains dan Teknologi Indonesia* 12(1): 31–37. DOI: 10.29122/jsti.v12i1.848.
- POWO. 2022. Plants of the World Online. Facilitated by Royal Botanic Gardens, Kew. <http://www.plantsoftheworldonline.org> (diakses 21 Desember 2022).
- Prentice IC, Meng T, Wang H, Harrison SP, Ni J, Wang G. 2011. Evidence of a universal scaling relationship for leaf CO₂ draw down a long aridity gradient. *New Phytologist* 190: 169–180.
- Press F, Siever R. 1982. *Earth* 2nd edition. Freeman, San Francisco, CA.
- PROSEA. 2019. Plant resources of South-East Asia. 2011. PROSEA. <http://proseanet.org/prosea/product.php>. (diakses 22 Juni 2019).
- Purcell C, Batke SP, Yiotis C, Caballero R, Soh WK, Murray M, McElwain JC. 2018. Increasing stomatal conductance in response to rising atmospheric CO₂. *Annals of Botany* 121(6): 1137–1149. DOI: 10.1093/aob/mcx208.
- Purnomo DW, LB Prasetyo, D Widyatmoko, SB Rushayati, A Yani, I Supriyatna. 2022. Diversity and carbon sequestration capacity of naturally growth vegetation in ex-nickel mining area in Kolaka, Southeast Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas* 23(3): 1433–1442. DOI: 10.13057/biodiv/d230330.
- Purwaningsih S. 2007. Kemampuan serapan karbon dioksida pada tanaman hutan kota di Kebun Raya Bogor. Skripsi. Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Sinambela TSP. 2006. Kemampuan serapan karbon dioksida 5 (lima) jenis tanaman hutan kota. Skripsi. Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Staples GW, Elevitch CT. 2006. Species profiles for pacific island agroforestry *Samanea saman* (raintree). Permanent Agriculture Resources (PAR), Hawai'i.
- Steinthorsdottir M, Wohlfarth B, Kylander M, Maarten B, Reimer P. 2013. Stomatal proxy record of CO₂ concentrations from the last termination suggests an important role for CO₂ at climate change transitions. *Quaternary Science Reviews* 68: 43–58. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.02.003.
- Sukmawati T, Fitrihidajati H, Indah NK. 2015. Penyerapan karbon dioksida pada tanaman hutan kota di Surabaya. *Lentera Bio4* (1): 108–111.
- Sutrian Y. 1992. *Pengantar Anatomi Tumbuh-Tumbuhan Tentang Sel dan Jaringan*. PT. Rineke Cipta, Jakarta.
- Taylor J, Harlow P, Niukula J. 2005. Invasive-plant assessment and weed management plan for the Fiji an Crested Iguana Sanctuary Island of Yadua Taba, Bua. The National Trust of Fiji Islands, Wildlife Conservation Society - South Pacific Program & Zoological Parks Board of New South Wales.
- Wang M, Wei H, Jeong BR. 2021. Lighting direction affects leaf morphology, stomatal characteristics, and physiology of head lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Molecular Sciences* 22: 3157. DOI: 10.3390/ijms22063157.
- Wang H, Wang R, Harrison SP, Prentice IC. 2022. Leaf morphological traits as adaptations to multiple climate gradients. *Journal of Ecology* 110: 1344–1355. DOI: 10.1111/1365-2745.13873.
- Widjaja EA, Rahayuningsih Y, Rahajoe JS, Ubaidillah R, Maryanto I, Walujo EB, Semiadi G. 2014. *Kekinian Keanekaragaman Hayati Indonesia 2014*. LIPI Press, Kementerian Lingkungan Hidup, Bappenas, Global Environmental Facility, UNDP, Jakarta.
- Xu F, Guo W, Xu W, Wei Y, Wang R. 2009. Leaf morphology correlates with water and light availability: What consequences for simple and

compoundleaves? *Progress in Natural Science* 19(12): 1789–1798. DOI:10.1016/j.pnsc.2009.10.001.

Yu X, Hui C, Sandhu HS, Lin Z, Shi P. 2019. Scaling relationships between leaf shape and area of 12 rosaceae species. *Symmetry* 11(10): 1255. DOI: 10.3390/sym11101255.