Received: 09 Feb 2024; Published: 18 Oct 2026
DOI: 10.14710/baf.11.2.2026.75-83

OPEN ACCESS

Buletin Anatomi dan Fisiologi

E-ISSN: 2541-0083
Vol. 11 (2), 2026

https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/baf/index

Anatomi Stomata Daun Cabai Merah (*Capsicum annuum L.*) Terhadap Perbedaan Intensitas Cahaya Matahari

Anatomy of Leaf Stomata (Capsicum annuum L.) in Response to Differences in Sunlight Intensity

Lisa Aslamiah[1]*, Amalia Putri Salsabila[1], Hanif Syafrian Purnama[2], Nur Aziema[1], Zaki Fahreza Sururi[1], Saefudin[1], Tri Suwandi[1]

[1] Program Studi Biologi, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia Jl. Dr. Setiabudhi No. 229, Bandung, 40154.
[2] Program Studi Magister Biologi, Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung
*) Corresponding author(s) email: lisaaslamiah@upi.edu

ABSTRAK

Intensitas radiasi matahari merupakan faktor lingkungan pembatas yang memicu plastisitas fenotipe tumbuhan melalui modifikasi struktural jaringan epidermis daun. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik tipe kompleks stomata, mengukur kerapatan stomata secara kuantitatif, mengevaluasi disparitas respons mikro morfologi daun, serta mengkaji mekanisme adaptasi hidrolik tanaman cabai merah (*Capsicum annuum L.)* yang ditumbuhkan pada dua gradien intensitas cahaya kontras di Kebun Botani UPI. Penelitian deskriptif eksperimental ini menggunakan metode cetakan replika epidermis abaksial (kuteks) pada daun dewasa fungsional yang dikoleksi dari area naungan (2.961 lux) dan area terbuka (24.060 lux). Preparat mikroskopis diamati pada perbesaran total 100× dengan kalibrasi mikrometer luas bidang pandang. Hasil pengamatan membuktikan bahwa konfigurasi aparatus stomata bersifat stabil dan konservatif pada kedua kondisi perlakuan, yakni bertipe anisositik (*cruciferous*) yang dikelilingi oleh tiga sel tetangga dengan satu sel berukuran lebih kecil. Kerapatan stomata pada kondisi naungan/gelap tercatat sebesar 237,8 stomata/mm^2, secara nyata lebih tinggi dibandingkan daun pada area terbuka/terang sebesar 224,2 stomata/mm^2, di mana kedua kelompok tergolong dalam kategori kerapatan rendah. Penurunan densitas stomata pada intensitas cahaya tinggi merepresentasikan strategi konservasi air jangka panjang untuk membatasi konduktansi stomatal dan laju transpirasi berlebih di bawah beban termal tinggi tengah hari. Rekomendasi penelitian selanjutnya mencakup analisis mikrometri ukuran celah stomata, penghitungan indeks stomata, pengukuran ketebalan kutikula epidermis, serta pemantauan konduktansi stomatal secara diurnal in situ guna mengoptimalkan manajemen mikroklimat budidaya cabai merah.

Kata kunci: anisositik, mikromorfologi, naungan, sel penutup, transpirasi

ABSTRACT

Solar irradiance serves as a pivotal limiting abiotic factor driving plant phenotypic plasticity through structural modifications of foliar epidermal tissues. This study aimed to characterize the stomatal complex type, quantitatively determine stomatal density, evaluate micromorphological disparities, and elucidate the hydraulic adaptation mechanisms of red chili leaves (Capsicum annuum L.) cultivated under contrasting light gradients at the UPI Botanical Garden. A descriptive experimental approach was applied using the abaxial epidermal nail polish impression method on functional mature leaves collected from shaded (2,961 lux) and exposed open-canopy areas (24,060 lux). Microscopic preparations were examined under 100× magnification using calibrated field of view micrometry. The results demonstrated that stomatal complex configuration remained highly conservative across both light regimes, exhibiting an anisocytic (cruciferous) architecture flanked by three subsidiary cells with one distinctly smaller. Stomatal density under shaded conditions reached 237.8 stomata/mm^2, which was higher than that of sun-exposed leaves at 224.2 stomata/mm^2, with both classified into the low-density category. The reduction in stomatal frequency under elevated irradiance reflects a long-term hydraulic conservation strategy to suppress stomatal conductance and excessive transpiration under high midday thermal loads. Future research should incorporate aperture micrometry, stomatal index determination, cuticle thickness profiling, and in situ diurnal conductance tracking to refine microclimate management for red chili horticulture.

Keywords: *anisocytic, guard cells, micromorphology, shading, transpiration*

© 2026 by Authors, Published by Universitas Diponegoro Publishing Group

This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license

PENDAHULUAN

Wilayah kepulauan Indonesia yang berada tepat di garis khatulistiwa dicirikan oleh iklim tropis basah dengan penyinaran matahari sepanjang tahun, kelembapan atmosfer yang tinggi, serta dinamika curah hujan musiman. Kondisi geo-klimatologis ini menempatkan Indonesia sebagai pusat keanekaragaman flora sekaligus wilayah agrikultur yang sangat potensial bagi pengembangan komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi. Di antara beragam komoditas sayuran buah yang dibudidayakan secara intensif, cabai merah (*Capsicum annuum* L.) menempati kedudukan yang sangat penting, baik dari perspektif ekonomi pedesaan maupun stabilitas inflasi pangan nasional (Husnul et al., 2023; Rozaini & Sonia, 2024). Fluktuasi pasokan dan lonjakan harga cabai merah di pasar domestik sering kali memicu dinamika sosio-ekonomi yang kompleks, mengingat cabai merah merupakan bahan bumbu kuliner harian utama masyarakat (Husnul et al., 2023). Oleh sebab itu, efisiensi budidaya dan pemahaman terhadap respon fisiologis tanaman ini terhadap faktor lingkungan menjadi prioritas penting dalam riset biologi terapan dan agronomi modern.

Pertumbuhan vegetatif, percabangan batang, inisiasi pembungaan, dan pematangan buah cabai merah sangat rentan terhadap cekaman abiotik lingkungan mikro (Kusmiyati et al., 2020). Keberhasilan produksi tanaman di lapangan dibatasi oleh berbagai variabel lingkungan tajuk, meliputi suhu udara permukaan, defisit kelembapan, serangan hama serangga maupun jamur patogen, serta ketersediaan kuantum radiasi cahaya matahari (Rozaini & Sonia, 2024). Sebagai anggota famili Solanaceae, *Capsicum annuum* tergolong tanaman herba yang memiliki laju metabolisme tinggi dan memerlukan asupan foton yang memadai untuk mendorong proses asimilasi karbon (Nugroho et al., 2019). Keterbatasan cahaya akibat naungan vegetasi lain dapat menekan pembentukan primordia bunga dan memicu gugurnya bakal buah, sedangkan radiasi surya yang terlalu intensif tanpa ketersediaan air tanah yang cukup dapat memicu stres fotooksidatif, denaturasi enzim fotosintesis, dan kavitasi jaringan hidrolik pembuluh (Khusni et al., 2018; Poorter et al., 2019).

Kemampuan tumbuhan untuk bertahan hidup dan mempertahankan produktivitasnya di bawah fluktuasi iklim mikro sangat bergantung pada koordinasi antara cetak biru genetik (*genotype*) dan plastisitas fenotipe (*phenotypic plasticity*). Plastisitas fenotipe merupakan kapasitas organisme untuk mengekspresikan karakter morfologis, anatomis, dan fisiologis yang berbeda ketika dihadapkan pada gradien kondisi lingkungan yang tidak seragam (Poorter et al., 2019). Cahaya matahari memegang peran multifungsional dalam siklus hidup tumbuhan; radiasi elektromagnetik pada spektrum tampak (400–700 nm) bertindak sebagai radiasi fotosintesis aktif (*photosynthetically active radiation*/PAR) yang menggerakkan sintesis ATP dan NADPH, sekaligus menjadi stimulus fotomorfogenik yang mengatur diferensiasi jaringan melalui aktivasi fitokrom dan kriptokrom (Wu et al., 2018).

Diferensiasi mikromorfologi daun merupakan salah satu manifestasi plastisitas fenotipe yang paling sensitif terhadap rezim radiasi surya (Budiono et al., 2016; Khusni et al., 2018). Daun yang berkembang di bawah naungan kanopi (*shade leaves*) umumnya melakukan restrukturisasi jaringan dengan membentuk lamina yang lebih tipis namun memiliki luas permukaan spesifik (*specific leaf area*/SLA) yang lebih besar, mengorganisasi susunan kloroplas di tepi dinding sel mesofil guna memaksimalkan tangkapan foton hambur, serta menyesuaikan arsitektur sistem jaringan vaskular dan epidermisnya. Sebaliknya, daun yang terpapar radiasi matahari penuh (*sun leaves*) merespons beban energi yang berlebih dengan mengembangkan lapisan kutikula lilin epikutikular yang tebal, menambah jumlah lapisan jaringan palisade, memadatkan sel mesofil, serta memodifikasi struktur kompleks aparatus stomata guna meregulasi keseimbangan hidrolik daun (Paluvi et al., 2015; Poorter et al., 2019).

Lamina daun menyerap energi foton melalui pigmen klorofil pada tilakoid kloroplas, yang kemudian ditransformasikan menjadi energi kimiawi berupa gula heksosa melalui reaksi gelap fotosintesis siklus Calvin-Benson. Aliran metabolit karbohidrat ini menjadi fondasi bagi biosintesis makromolekul dinding sel, asam amino struktural, dan metabolit sekunder protektif (Setiawati & Syamsi, 2019). Namun, proses asimilasi karbon memerlukan pasokan gas karbon dioksida (CO_2) atmosferik secara berkesinambungan ke dalam rongga interseluler mesofil. Struktur mikroskopis yang berfungsi sebagai pintu gerbang regulasi pertukaran gas tersebut adalah aparatus stomata (Bertolino et al., 2019; Dow et al., 2014).

Secara anatomi, stomata terdiri atas celah porus mikroskopis yang dibatasi oleh sepasang sel penutup (*guard cells*) terspesialisasi yang dikelilingi oleh sel-sel tetangga epidermis (*subsidiary cells*) (Nugroho et al., 2019). Sel penutup memiliki dinding sel dengan ketebalan asimetris, di mana

dinding sel yang menghadap ke porus stomata jauh lebih tebal dan diperkuat oleh mikrofibril selulosa radial dibandingkan dinding sel bagian punggung yang lebih tipis dan elastis (Bertolino et al., 2019). Mekanisme pembukaan stomata dikendalikan oleh perubahan tekanan turgor intraseluler sel penutup. Stimulasi foton cahaya biru mengaktivasi enzim pada membran plasma sel penutup, memicu pemompaan proton keluar sel dan menghasilkan potensial membran negatif (Wu et al., 2018). Polarisasi membran ini memicu aktivasi kanal kalium tergerbang voltase (*voltage-gated inward potassium channels*), mendorong influks masif ion K+, anion klorida (Cl-), serta sintesis anion malat di dalam sitosol. Akumulasi ion osmotik ini menurunkan potensial osmotik dan potensial air sel penutup, menyebabkan air masuk secara osmosis dari sel tetangga epidermis ke dalam sel penutup (Wu et al., 2018). Peningkatan tekanan turgor mendorong pemanjangan dinding sel luar yang elastis ke arah lateral, menarik dinding dalam yang tebal menjauh sehingga celah porus stomata membuka lebar (Bertolino et al., 2019).

Meskipun pembukaan celah stomata esensial bagi penyerapan CO_2, transpirasi yang menyertainya dapat mengancam integritas hidrolik tanaman apabila laju evaporasi melampaui kemampuan konduksi xilem perakaran. Di bawah kondisi lingkungan tropis tengah hari yang terik dengan suhu udara tinggi dan kelembapan rendah, defisit tekanan uap air (*vapor pressure deficit*/VPD) antara rongga substomata daun dan atmosfer meningkat drastis (Bertolino et al., 2019). Kondisi ini dapat memicu stres kekeringan lokal, dehidrasi sel parenkim mesofil, penutupan stomata dini, dan penghentian proses fotosintesis, untuk mengimbangi dilema ini, tumbuhan mengembangkan adaptasi jangka panjang melalui modifikasi plastisitas kerapatan stomata (*stomatal density*) dan frekuensi pembelahan sel meristemoid pada saat perkembangan daun muda (Dow et al., 2014).

Literatur mengenai respons kerapatan stomata terhadap intensitas cahaya menunjukkan variabilitas yang beragam antarspesies. Studi fisiologi klasik pada tanaman herba subtropis melaporkan bahwa daun yang terpapar intensitas radiasi tinggi membentuk kerapatan stomata yang lebih banyak dibandingkan daun naungan. Kenaikan densitas stomata ini dipandang sebagai upaya fisiologis untuk memperbesar konduktansi stomata daun maksimum guna mendukung laju asimilasi fotosintesis yang tinggi di bawah pasokan foton berlebih. Namun demikian, sejumlah riset ekofisiologi pada tanaman herba dan pohon tropis mencatat respon yang berlawanan, di mana kerapatan stomata justru menurun pada lingkungan berintensitas cahaya tinggi sebagai strategi pertahanan hidrolik untuk menekan penguapan air yang tidak terkendali (Julianti et al., 2024; Morales-Navarro et al., 2018; Paluvi et al., 2015).

Perbedaan temuan literatur tersebut menunjukkan adanya kesenjangan riset (*research gap*) yang mendasar mengenai dinamika mikroanatomi daun cabai merah (*Capsicum annuum* L.) di lingkungan tropis Indonesia. Sebagian besar penelitian budidaya cabai merah selama ini cenderung terfokus pada evaluasi makro-agronomi seperti penambahan pupuk, aplikasi pestisida, atau pengukuran bobot basah buah panen (Husnul et al., 2023; Kusmiyati et al., 2020; Rozaini & Sonia, 2024). Aspek mikroanatomi epidermis, stabilitas konfigurasi sel tetangga tipe kompleks stomata, serta modulasi kerapatan porus daun cabai dewasa di bawah rezim radiasi alami kontras belum dievaluasi secara terukur dan komprehensif (Budiono et al., 2016; Setiawati & Syamsi, 2019). Selain itu, belum ada kajian yang menguraikan secara mendalam bagaimana tanaman cabai merah memediasi kompromi biofisika antara penyerapan karbon dan efisiensi penggunaan air (*water-use efficiency*/WUE) melalui penyesuaian densitas stomata di habitat terik tropis. Ketiadaan data mikroanatomi ini menghambat formulasi manajemen naungan yang presisi pada budidaya hortikultura komersial.

Berdasarkan kesenjangan ilmiah tersebut, penelitian ini dilaksanakan dengan serangkaian tujuan komparatif yang terpadu: (1) mengidentifikasi dan mengkarakterisasi tipe kompleks susunan sel tetangga stomata pada permukaan abaksial daun cabai merah (*C. annuum*); (2) mengukur secara kuantitatif kerapatan stomata per milimeter persegi pada daun yang tumbuh di area naungan (2.961 lux) versus area terbuka (24.060 lux); (3) mengevaluasi disparitas respons dimensi dan bentuk sel penutup stomata terhadap penerimaan energi surya lingkungan; serta (4) menguraikan mekanisme adaptasi hidrolik struktural daun dewasa *C. annuum* dalam mereduksi laju transpirasi berlebih di bawah iklim mikro Kebun Botani Universitas Pendidikan Indonesia. Hasil riset ini diharapkan mampu menyediakan landasan teoritis mengenai plastisitas anatomi famili Solanaceae serta memberikan wawasan praktis bagi rekayasa mikroklimat budidaya cabai merah presisi.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian, Tempat, dan Waktu

Penelitian ini dirancang menggunakan metode deskriptif eksperimental kuantitatif guna

membandingkan struktur mikroanatomi dan respons kerapatan stomata daun tanaman cabai merah yang ditumbuhkan pada dua rezim penyinaran matahari yang kontras. Kegiatan penelitian lapangan, pemetikan sampel daun, serta karakterisasi parameter abiotik lingkungan mikro dilaksanakan selama kurun waktu dua minggu, terhitung dari tanggal 1 April hingga 14 April 2023. Koleksi sampel tanaman cabai merah dilakukan di kawasan Kebun Botani Universitas Pendidikan Indonesia (UPI), Jalan Dr. Setiabudhi No. 229, Isola, Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat. Proses pembuatan preparat histologi non-permanen, kalibrasi optik bidang pandang mikrometer, serta pengamatan mikroskopis dan penghitungan densitas seluler dilakukan di Laboratorium Struktur Tumbuhan dan Laboratorium Ekologi, Departemen Pendidikan Biologi, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia.

Bahan Tanaman dan Teknik Pengambilan Sampel

Material biologis yang diteliti adalah daun segar tanaman cabai merah (*Capsicum annuum* L.) varietas lokal yang tumbuh pada kondisi media tanam tanah lempung berpasir dan rezim pemeliharaan agronomi yang seragam di Kebun Botani UPI. Pengambilan sampel daun dilakukan dengan menerapkan metode *purposive sampling* berdasarkan kriteria kesehatan morfologi tanaman yang ketat. Tanaman yang dipilih adalah individu yang tumbuh tegak vigor, memiliki tinggi tanaman seragam, bebas dari defisiensi hara, serta tidak menunjukkan gejala klorosis, nekrosis, maupun serangan hama kutu daun (*aphids*) dan tungau daun. Organ daun yang diambil distandardisasi pada posisi nodus aksilar yang identik, yakni daun kedua dari kuncup apikal pucuk tanaman yang telah membuka sempurna, telah berkembang penuh, dan memiliki aktivitas fisiologis aktif (*mature functional leaves*). Pengambilan sampel dilakukan sebanyak 6 ulangan biologis independen dari dua lokasi dengan kondisi pencahayaan yang berbeda nyata. Lokasi pertama merupakan area ternaungi (*shaded environment*) di bawah tegakan pohon peneduh lebat yang menerima radiasi matahari tereduksi sebagai representasi titik gelap/intensitas rendah. Lokasi kedua merupakan area terbuka tanpa naungan vegetasi (*open-canopy environment*) yang menerima paparan radiasi matahari penuh sebagai representasi titik terang/intensitas tinggi. Seluruh pemetikan sampel daun pada kedua area dilakukan secara serentak tepat pada pukul 12.00 WIB guna menyamakan ritme endogen sirkadian dan status potensial air daun di bawah pemanasan surya tengah hari.

Karakterisasi Parameter Fisik Abiotik Lingkungan

Perekaman variabel mikroklimat abiotik dilakukan secara langsung (*in situ*) di lokasi penanaman bersamaan dengan waktu pemetikan sampel daun pada pukul 12.00 WIB. Intensitas radiasi cahaya matahari diukur menggunakan alat digital lux meter portabel tipe AS803 (Smart Sensor) yang telah terkalibrasi pabrik. Sensor fotodetektor lux meter diarahkan secara horizontal dan tegak lurus terhadap arah radiasi foton surya tepat di atas kanopi daun kedua tanaman cabai merah. Pengukuran dilakukan sebanyak lima kali pembacaan berulang untuk mendapatkan nilai rerata intensitas pencahayaan. Berdasarkan hasil pengukuran lapangan, area ternaungi mencatatkan intensitas cahaya rata-rata sebesar 2.961 lux, sedangkan area terbuka mencatatkan intensitas radiasi yang jauh lebih tinggi sebesar 24.060 lux. Selain parameter intensitas foton, suhu udara mikro diukur menggunakan sensor termometer digital pada ketinggian tajuk tanaman (sekitar 40–50 cm di atas permukaan tanah). Suhu udara lingkungan tercatat sebesar 27,3 °C pada area ternaungi dan 27,7 °C pada area terbuka. Data mikroklimat ini didokumentasikan sebagai variabel eksternal yang melandasi interpretasi adaptasi fisiologis dan anatomis daun.

Instrumen Laboratorium, Peralatan, dan Bahan Kimia

Instrumen laboratorium yang digunakan dalam penelitian ini meliputi mikroskop cahaya binokuler (Olympus CX23) yang dilengkapi kondensor Abbe dan sumber penerangan LED terintegrasi, mikrometer objektif standar (skala terkecil 0,01 mm), mikrometer okuler, kaca objek preparat (*glass slide*), kaca penutup (*cover glass*), digital lux meter AS803, digital termometer, pinset anatomis berujung runcing, gunting preparasi jaringan, silet tajam, penggaris milimeter blok, kantong plastik spesimen berlabel kedap udara, wadah berinsulasi pendingin (*cool box*), alat tulis, dan kamera mikrograf resolusi tinggi untuk dokumentasi citra digital. Bahan kimia dan perlengkapan preparasi mencakup daun segar *Capsicum annuum* L., cat kuku transparan berbasis selulosa ester nitroselulosa (*kuteks* bening), selotip transparan berperekat kuat (*cellophane tape*), kapas murni steril, kertas hisap bebas serat, dan akuades deionisasi murni.

Prosedur Pembuatan Preparat Cetakan Stomata (Replika Kuteks)

Pengamatan struktur anatomi stomata dilakukan menggunakan metode non-destruktif cetakan replika epidermis abaksial daun (*whole-mount epidermal impression method*) dengan cat kuku transparan, mengacu pada modifikasi protokol Budiono et al. (2016) dan Setiawati & Syamsi (2019). Daun cabai merah segar yang baru dipetik segera diletakkan di atas meja preparasi dengan posisi permukaan abaksial (sisi punggung bawah) menghadap ke atas. Permukaan abaksial daun dibersihkan secara lembut menggunakan kapas steril yang dibasahi akuades untuk membersihkan lapisan debu partikulat dan residu tanah bentik yang berpotensi mengaburkan kontur porus stomata, kemudian dikeringkan dengan kertas hisap. Lapisan tipis cat kuku transparan dioleskan secara merata menggunakan kuas aplikator halus pada area interkostal lamina (di antara tulang-tulang daun sekunder), dengan menghindari area tulang daun utama (*midrib*) yang memiliki morfologi sel epidermis memanjang tanpa stomata fungsional. Lapisan kuteks dibiarkan mengalami polimerisasi dan mengering secara alami di udara terbuka laboratorium selama 10 hingga 15 menit hingga membentuk selaput polimer padat transparan yang lentur. Sepotong selotip bening ditempelkan secara hati-hati di atas selaput kuteks yang telah mengering, kemudian ditekan lembut menggunakan ujung ibu jari untuk memastikan kontak rekat yang sempurna tanpa menyisakan gelembung udara. Selotip beserta lapisan cetakan kuteks ditarik secara perlahan dari permukaan helai daun dengan sudut penarikan konstan, sehingga diperoleh impresi cetakan negatif arsitektur dinding sel epidermis dan kompleks stomata. Selaput kuteks tersebut kemudian ditempelkan secara rata di atas permukaan kaca objek bersih, dirapikan agar tidak berkerut, ditutup menggunakan kaca penutup, dan diberi label identitas perlakuan.

Pengamatan Mikroskopis dan Analisis Morfometri Kuantitatif

Preparat replika diamati di bawah mikroskop cahaya pada perbesaran lensa objektif 10× dan okuler 10× (perbesaran total 100×). Karakterisasi kualitatif tipe stomata dilakukan dengan mengamati susunan topografi, orientasi, serta jumlah sel tetangga yang melingkari sepasang sel penutup merujuk pada sistem klasifikasi morfologi anatomi dikotil Metcalfe & Chalk (1957) dan Nugroho et al. (2019). Luas bidang pandang mikroskopis ditentukan secara geometris menggunakan mikrometer objektif terkalibrasi. Diameter bidang pandang (d) pada perbesaran 100× terukur sebesar 0,25 mm, sehingga luas bidang untuk perbesaran 100 x = ¼ π d2 = ¼ x 3,14 x $(0{,}25)^2$ = 0,0490625 mm^2. Penghitungan jumlah stomata dilakukan pada 10 bidang pandang acak yang representatif untuk setiap preparat ulangan daun. Nilai kerapatan stomata per satuan luas milimeter persegi dihitung menggunakan persamaan:

$$Kerapatan\ stomata\ = \frac{Jumlah\ stomata}{Luas\ bidang\ pandang}$$

Data jumlah stomata dari seluruh bidang pandang dan ulangan biologis dikonversi ke dalam satuan stomata/mm^2, kemudian ditabulasi untuk menghitung nilai rerata dan simpangan baku.

Analisis Data

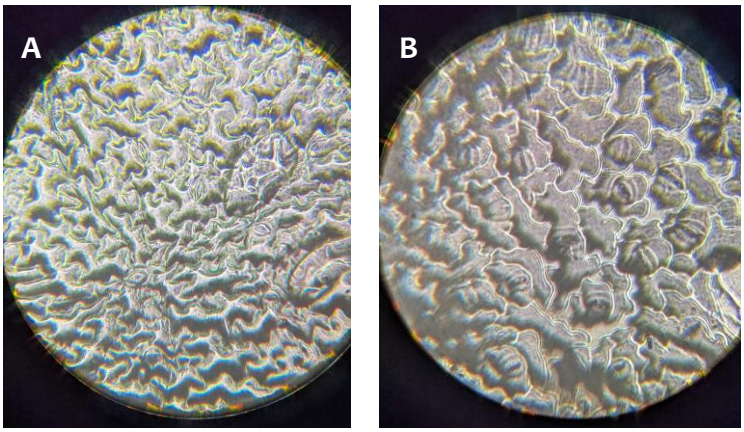
Data primer yang diperoleh dari penghitungan kerapatan stomata, intensitas cahaya, dan suhu udara dianalisis secara statistik kuantitatif deskriptif menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel 2021. Nilai kerapatan stomata disajikan dalam bentuk nilai rerata disertai standar deviasi (rerata $\pm$ SD) dan diklasifikasikan ke dalam kategori kelas kerapatan stomata merujuk pada standar Tambaru (2012) dan Budiono et al. (2016). Perbandingan mikrograf arsitektur stomata antara daun naungan dan daun terbuka dianalisis secara deskriptif komparatif guna menginterpretasikan mekanisme plastisitas seluler daun.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan stomata pada sampel daun *Capsicum annuum* L. serta beberapa faktor abiotik dapat dilihat pada Tabel 1. dan Gambar 1.

Tabel 1. Hasil Pengamatan Stomata Daun *Capsicum annuum* L. serta Faktor Abiotik di Lingkungan yang Berbeda

No.	Perlakuan	Intensitas Cahaya (lux)	Suhu (°C)	Jenis Stomata	Kerapatan Stomata (jml/mm^2)
1	Terang	24060	27,7	Anisositik	224,2
2	Gelap	2961	27,3	Anisositik	237,8



Gambar 1. Anatomi Stomata Sampel Daun *Capsicum annuum* L. di Lingkungan dengan Intensitas Cahaya Tinggi (A) dan Rendah (B), Perbesaran 100x.

Pengamatan mikroskopis pada perbesaran total 100× mengungkap adanya respons plastisitas mikroanatomi yang nyata pada daun *Capsicum annuum* L. akibat perbedaan paparan radiasi matahari alami. Daun cabai merah yang tumbuh pada zona ternaungi (intensitas rendah 2.961 lux) menunjukkan kerapatan stomata rata-rata sebesar 237,8 stomata/mm², sedangkan daun yang berkembang pada zona terbuka tanpa naungan (intensitas tinggi 24.060 lux) menunjukkan kerapatan stomata rata-rata sebesar 224,2 stomata/mm² (Tabel 1). Terjadi perbedaan penurunan kerapatan stomata sebesar 13,6 stomata/mm² pada tanaman yang terpapar intensitas radiasi matahari penuh. Walaupun terdapat perbedaan numerik antara kedua kondisi tersebut, mengacu pada sistem klasifikasi kerapatan stomata menurut Tambaru (2012) dan Budiono et al. (2016)—yang mengelompokkan kerapatan ke dalam tiga kategori, yakni rendah (< 300 stomata/mm²), sedang (300-500 stomata/mm²), dan tinggi (>500 stomata/mm²)—nilai kerapatan stomata daun cabai merah pada kedua perlakuan pencahayaan ini tergolong ke dalam kategori kerapatan rendah.

Berdasarkan analisis visual terhadap mikrograf preparat cetakan epidermis (Gambar 1), teramati adanya disparitas mikromorfologi pada dimensi sel penutup dan pola dinding antiklinal sel epidermis di sekitar stomata. Daun cabai merah yang tumbuh di area naungan memperlihatkan sel-sel penutup stomata yang berdimensi relatif lebih besar dan tampak lebih meregang, dengan dinding antiklinal sel epidermis biasa yang bergelombang (*undulate*) secara mencolok. Bentuk dinding epidermis yang bergelombang pada daun naungan berfungsi memperluas ruang kontak adhesi mekanik antarsel dan memfasilitasi kelenturan lamina daun yang tipis di bawah hembusan angin mikro (Kendari et al., 2020; Poorter et al., 2019). Sebaliknya, daun yang terpapar sinar matahari langsung memperlihatkan stomata dengan sel penutup yang berdimensi lebih ramping dan kompak, di mana dinding antiklinal sel epidermis tampak lebih lurus atau bergelombang dangkal dengan orientasi jaringan yang padat. Kondisi ini mencerminkan penguatan struktur mekanik epidermis dan akumulasi mikrofibril dinding sel yang lebih tebal pada lingkungan beradiasi tinggi.

Karakteristik arsitektur kompleks stomata pada kedua kelompok perlakuan menunjukkan tipe yang seragam dan stabil, yakni bertipe anisositik (*cruciferous type*) (Gambar 1). Kompleks stomata anisositik dicirikan oleh keberadaan sepasang sel penutup yang dikelilingi secara khas oleh tiga buah sel tetangga epidermis (*subsidiary cells*), dengan salah satu sel tetangga memiliki ukuran yang secara signifikan lebih kecil dibandingkan dua sel tetangga lainnya (Nugroho et al., 2019). Stabilitas tipe stomata ini menegaskan bahwa susunan sel tetangga merupakan karakter taksonomi diagnostik yang sangat terikat secara filogenetik pada tingkat famili Solanaceae, termasuk genus *Capsicum*, dan tidak mengalami alterasi morfogenik meskipun tanaman dihadapkan pada fluktuasi intensitas radiasi matahari yang sangat kontras (Nugroho et al., 2019).

Temuan penelitian ini—di mana kerapatan stomata daun cabai merah di tempat naungan tercatat lebih tinggi dibandingkan di tempat terang—memberikan wawasan penting mengenai strategi adaptasi hidrolik tanaman sayuran tropis. Dalam paradigma fisiologi tumbuhan klasik, peningkatan intensitas radiasi foton kerap diasosiasikan dengan peningkatan kerapatan stomata per satuan luas lamina. Peningkatan densitas ini dipandang sebagai respon terprogram

untuk memfasilitasi difusi gas CO_2 dalam jumlah besar guna mendukung laju asimilasi fotosintesis yang tinggi di bawah kelimpahan energi foton. Daun dewasa yang menerima penyinaran intensif mengirimkan sinyal sistemik jarak jauh ke primordia daun muda untuk memacu laju pembelahan asimetris sel protoderm epidermis menjadi sel meristemoid stomata.

Namun demikian, hasil penelitian pada tanaman cabai merah (*C. annuum*) ini memperlihatkan fenomena yang berbeda, yang membuktikan bahwa modulasi kerapatan stomata tidak semata-mata diatur oleh kebutuhan asimilasi karbon, melainkan merupakan hasil kompromi biofisika antara penyerapan CO_2 dan pencegahan stres hidrolik dehidrasi daun (Bertolino et al., 2019; Dow et al., 2014). Di area naungan Kebun Botani UPI, intensitas cahaya hanya terukur sebesar 2.961 lux. Pada kondisi pencahayaan rendah ini, ketersediaan foton radiasi fotosintesis aktif (PAR) menjadi faktor pembatas utama bagi fotolisis air dan eksitasi elektron di fotosistem II (Khusni et al., 2018). Sebagai bentuk kompensasi fisiologis terhadap defisit foton, tanaman membentuk daun dengan kerapatan stomata yang lebih tinggi (237,8 stomata/mm^2). Kerapatan stomata yang lebih banyak ini mereduksi resistensi stomatal terhadap difusi gas masuk, memungkinkan molekul CO_2 berdifusi secara leluasa ke dalam ruang antar-sel mesofil yang lebar, sehingga efisiensi fiksasi karbon per unit foton yang diserap tetap optimal (Paluvi et al., 2015; Poorter et al., 2019).

Sebaliknya, pada lingkungan terbuka tanpa naungan, daun cabai merah terpapar radiasi matahari penuh sebesar 24.060 lux dengan temperatur udara mikro mencapai 27,7 °C pada tengah hari pukul 12.00 WIB. Beban radiasi termal yang tinggi ini memicu peningkatan suhu lamina daun di atas suhu udara ambien, yang secara bersamaan menciptakan defisit tekanan uap air (*vapor pressure deficit*/VPD) yang sangat curam antara rongga udara substomata daun yang jenuh air dengan atmosfer luar (Bertolino et al., 2019). Peningkatan gradien VPD ini mempercepat laju evaporasi air melalui porus stomata secara eksponensial. Jika tanaman cabai merah di lingkungan terbuka mempertahankan kerapatan stomata yang tinggi, maka laju transpirasi daun akan melampaui kapasitas konduktivitas hidrolik xilem batang dan perakaran, yang berisiko memicu kavitasi pembuluh, embolisme hidrolik, penutupan stomata total secara mendadak, serta stres layu permanen pada mesofil (Bertolino et al., 2019).

Oleh karena itu, reduksi kerapatan stomata menjadi 224,2 stomata/mm^2 pada daun terbuka bertindak sebagai strategi konservasi hidrolik jangka panjang. Penurunan jumlah stomata per satuan luas secara efektif menurunkan konduktansi stomata daun maksimum, membatasi pelepasan uap air total ke atmosfer, serta memelihara potensial air dan turgiditas jaringan mesofil agar tetap stabil di bawah beban radiasi surya yang terik (Dow et al., 2014; Morales-Navarro et al., 2018). Penyesuaian mikroanatomi ini sangat adaptif dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air (*water-use efficiency*/WUE), yakni rasio biomassa karbon yang diasimilasi per unit molekul air yang ditranspirasikan (Bertolino et al., 2019). Temuan ini sejalan dengan penelitian Morales-Navarro et al. (2018) pada tanaman tomat, yang menunjukkan bahwa manipulasi genetik melalui overekspresi gen *SDD1* yang menekan kerapatan stomata berhasil meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan dan radiasi tinggi tanpa mengorbankan produktivitas fotosintesis secara merugikan.

Perbedaan kerapatan stomata pada cabai merah ini juga merupakan respon integratif terhadap multivariabel mikroklimat lainnya. Inisiasi pembelahan sel induk stomata pada lapisan protoderm daun sangat dipengaruhi oleh interaksi antara intensitas cahaya, kelembapan relatif udara, suhu mikro, konsentrasi gas CO_2 di sekitar tajuk, serta dinamika hormon endogen tanaman seperti asam absisat (ABA) dan auksin (Setiawati & Syamsi, 2019). Mikroklimat tajuk yang memiliki fluktuasi konsentrasi CO_2 lokal dan kelembapan tinggi dapat menstimulasi diferensiasi stomata. Di area naungan Kebun Botani UPI, kelembapan udara relatif mikro terjaga lebih stabil dan laju penguapan permukaan daun berlangsung lambat, menciptakan mikrolingkungan yang kondusif bagi sel-sel protoderm untuk membelah dan berdiferensiasi menjadi meristemoid stomata (Julianti et al., 2024; Khusni et al., 2018). Sebaliknya, di area terbuka yang terik, kekeringan atmosferik mikro memicu sintesis hormon ABA lokal yang berperan sebagai sinyal inhibitor terhadap pembelahan sel meristemoid, menghasilkan daun dengan kerapatan stomata yang lebih rendah namun memiliki lapisan kutikula yang lebih kedap air.

KESIMPULAN

Perbedaan intensitas cahaya matahari terbukti memodulasi karakter mikroanatomi daun cabai merah (*Capsicum annuum* L.), terutama pada parameter kerapatan stomata dan mikromorfologi sel epidermis, sedangkan konfigurasi tipe aparatus stomata bersifat stabil bertipe anisositik pada kedua kondisi pencahayaan. Tanaman cabai merah yang tumbuh di lingkungan naungan (intensitas rendah 2.961 lux) memiliki kerapatan stomata

sebesar 237,8 stomata/mm², yang secara nyata lebih tinggi dibandingkan tanaman di area terbuka terpapar sinar matahari langsung (224,2 stomata/mm²), di mana kedua kelompok tergolong dalam kategori kerapatan rendah. Penurunan densitas stomata pada intensitas cahaya tinggi merefleksikan mekanisme plastisitas hidrolik daun dewasa untuk menekan konduktansi stomatal daun maksimum, meminimalkan laju transpirasi berlebih, serta meningkatkan efisiensi penggunaan air (*water-use efficiency*) di bawah beban radiasi termal siang hari yang terik.

Sebagai rekomendasi penelitian lanjutan (*future research directions*), eksplorasi riset berikutnya disarankan untuk mengukur rasio indeks stomata (*stomatal index*) guna memverifikasi apakah penurunan kerapatan stomata murni diakibatkan oleh hambatan inisiasi sel meristemoid stomata atau akibat pembesaran ukuran sel epidermis biasa (*cell expansion*), melakukan analisis mikrometri panjang dan lebar celah porus stomata serta ketebalan lapisan lilin kutikula epidermis menggunakan mikroskop elektron pemindai (*Scanning Electron Microscopy*/SEM), memantau dinamika harian (*diurnal pattern*) laju transpirasi, konduktansi stomata, dan asimilasi fotosintesis secara *in situ* menggunakan instrumen penganalisis pertukaran gas portabel (*Portable Gas Exchange System*), serta mengaplikasikan modifikasi taraf naungan buatan (seperti jaring paranet 25%, 50%, dan 75%) untuk menentukan ambang intensitas pencahayaan optimal bagi budidaya tanaman cabai merah komersial di wilayah tropis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pengelola Kebun Botani Universitas Pendidikan Indonesia atas izin penelitian dan fasilitas pemeliharaan tanaman cabai merah, serta kepada Kepala Laboratorium Struktur Tumbuhan dan Laboratorium Ekologi Departemen Pendidikan Biologi FPMIPA UPI atas penyediaan instrumen mikroskop dan sarana laboratorium selama riset ini dilaksanakan

DAFTAR PUSTAKA

Bertolino, L. T., Caine, R. S., & Gray, J. E. (2019). Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world. *Frontiers in Plant Science*, 10, 225. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00225

Budiono, R., Sugiarti, D., Nurzaman, M., Setiawati, T., Supriatun, T., & Mutaqin, A. Z. (2016). Kerapatan stomata dan kadar klorofil tumbuhan *Clausena excavata* berdasarkan perbedaan intensitas cahaya. *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 9(1), 54–60.

Casson, S., & Gray, J. E. (2008). Influence of environmental factors on stomatal development. *New Phytologist*, 178(1), 9–23. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02351.x

Dow, G. J., Bergmann, D. C., & Berry, J. A. (2013). An integrated model of stomatal development and leaf physiology. New Phytologist, 201(4), 1218–1226. https://doi.org/10.1111/nph.12608

Husnul, K., Rosmawaty, R., & Fyka, S. A. (2023). Analisis peramalan produksi dan harga cabai merah (*Capsicum annuum* L.) di Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Farmagrisains: Jurnal Farmasi, Sains, dan Teknologi*, 10(2), 125–134.

Julianti, M. A., Darmanti, S., & Haryanti, S. (2024). Karakteristik stomata dan trikoma lima spesies gulma familia Asteraceae di Waduk Pendidikan Universitas Diponegoro. *Buletin Anatomi dan Fisiologi*, 9(1), 39–47. https://doi.org/10.14710/baf.9.1.2024.39-47

Khusni, L., Hastuti, R. B., & Prihastanti, E. (2018). Pengaruh naungan terhadap pertumbuhan dan aktivitas antioksidan pada bayam merah (*Alternanthera amoena* Voss.). *Buletin Anatomi dan Fisiologi*, 3(1), 62–70. https://doi.org/10.14710/baf.3.1.2018.62-70

Kusmiyati, F., Sutarno, S., & Budi, S. (2020). Keragaman genetik dan heritabilitas karakter agronomi beberapa genotipe cabai merah (*Capsicum annuum* L.). *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 3(1), 1–6.

Morales-Navarro, S., Pérez-Díaz, R., Ortega, A., de Marcos, A., Mena, M., Fenoll, C., González-Villanueva, E., & Ruiz-Lara, S. (2018). Overexpression of a SDD1-like gene from wild tomato decreases stomatal density and enhances dehydration avoidance in *Arabidopsis* and cultivated tomato. *Frontiers in Plant Science*, 9, 940. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00940

Nugroho, L. H., Purnomo, P., & Issirep, S. (2019). *Struktur dan Perkembangan Tumbuhan* (Edisi Revisi). Penebar Swadaya.

Paluvi, N., Mukarlina, & Linda, R. (2015). Struktur anatomi daun, kantung dan sulur *Nepenthes gracilis* Korth. yang tumbuh di area intensitas cahaya berbeda. *Jurnal Protobiont*, 4(1), 103–107.

Poorter, H., Niinemets, Ü., Ntagkas, N., Siebenkäs, A., Mäenpää, M., Matsubara, S., & Pons, T. L. (2019). A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance. *New Phytologist*, 223(3), 1073–1105.

Rozaini, N., & Sonia, S. (2024). Analisis fluktuasi harga terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas usaha tani cabai merah di Indonesia. *Jurnal Riset dan Inovasi Manajemen*, 2(2), 168–174.

Setiawati, T., & Syamsi, I. F. (2019). Karakteristik stomata berdasarkan estimasi waktu dan perbedaan intensitas cahaya pada daun *Hibiscus tiliaceus* Linn. di Pangandaran, Jawa Barat. *Jurnal Pro-Life*, 6(2), 148–159.

Wu, G., Liu, H., Hua, L., Luo, Q., Lin, Y., He, P., Feng, S., Liu, J., & Ye, Q. (2018). Differential responses of stomata and photosynthesis to elevated temperature in two co-occurring subtropical forest tree species. *Frontiers in Plant Science*, 9, 467. doi: 10.3389/fpls.2018.00467