

Respons Fisiologis Tanaman Secang (*Caesalpinia sappan* L.) terhadap Variasi Jarak Tanam dan Aplikasi Metil Jasmonat serta Asam Salisilat

Annisa Lugina Rachman¹, Santi Rosniawaty^{2*}, Syariful Mubarak² dan Mira Ariyanti²

¹Program Studi Magister Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran

²Departemen Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran

Jl. Raya Bandung-Sumedang KM-21, Jatinangor 45363

*Alamat korespondensi: santi.roniawaty@unpad.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 04-11-2025

Direvisi: 20-02-2026

Dipublikasi: 04-05-2026

ABSTRACT/ABSTRAK

Responses of sappanwood (*Caesalpinia sappan* L.) to plant spacing and the application of methyl jasmonate and salicylic acid

Keywords:
Chlorophyll index,
Light intensity,
Phytohormones,
Stomatal conductance,
Stomatal density

The cultivation can be enhanced through optimized planting spacing and the application of phytohormones such as salicylic acid (SA) and methyl jasmonate (MeJA). This study aimed to determine the interaction between planting spacing and the application of SA and MeJA on the physiological responses sappanwood. The experiment was conducted at the experimental field and the Food and Plantation Laboratory, Faculty of Agriculture, Universitas Padjadjaran from July to December 2024. A Split-Plot Design was used, with planting spacing (J) as the main plot, hormone application (H) as the subplot, and three replications. The main plot comprised three planting spacing ($j_1 = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, $j_2 = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, $j_3 = 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$), and the subplots included three hormone treatments ($h_0 = \text{control}$, $h_1 = \text{SA } 200 \text{ ppm}$, $h_2 = \text{MeJA } 100 \text{ ppm}$). Physiological parameters observed included leaf chlorophyll index, stomatal conductance, and stomatal density. The results showed that the leaf chlorophyll index was significantly affected by h_1 , with the best interaction found in $j_2 \times h_2$. The highest stomatal conductance was observed at the widest planting spacing (j_3), both independently and in interaction with SA. Meanwhile, stomatal density was independently influenced by the narrowest planting spacing (j_1) and by MeJA, which showed no significant difference from control, with the best interaction found in $j_1 \times h_2$. Overall, the regulation of planting spacing and the application of phytohormones SA and MeJA can be optimized as a cultivation strategy to enhance the physiological responses of sappanwood plants more effectively.

Kata Kunci:
Fitohormon, Indeks
klorofil, Intensitas
cahaya, Kerapatan
stomata, Konduktansi
stomata

Secang adalah tanaman berguna dalam bidang farmakologis, namun budidayanya belum banyak dilakukan. Teknik budidaya yang dapat dilakukan yaitu dengan pengaturan jarak tanam dan aplikasi fitohormon berupa asam salisilat (SA) dan metil jasmonat (MeJA). Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui interaksi antara jarak tanam dengan fitohormon SA dan MeJA terhadap respons fisiologis tanaman secang. Penelitian dilaksanakan di Kebun Percobaan dan Laboratorium Pangan dan Perkebunan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran pada bulan Juli hingga Desember 2024. Percobaan menggunakan Rancangan Petak Terbagi, dengan jarak tanam (J) sebagai petak utama dan aplikasi hormon eksogen (H) sebagai anak petak. Penelitian ini dilakukan dengan 3 ulangan. Petak terdiri dari tiga taraf, yaitu jarak tanam: $j_1 = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, $j_2 = 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, dan $j_3 = 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$. Adapun anak petak, yaitu aplikasi hormon eksogen (H) yang terdiri dari 3 taraf, yaitu: $h_0 = \text{tanpa aplikasi hormon}$

eksogen, $h_1 = SA$ 200 ppm, dan $h_2 = MeJA$ 100 ppm. Pengamatan fisiologis yang dilakukan meliputi indeks klorofil daun, nilai konduktansi stomata, dan kerapatan stomata. Hasil penelitian menunjukkan bahwa indeks klorofil daun dipengaruhi secara mandiri oleh h_1 , dengan interaksi terbaik pada $j_2 \times h_2$. Konduktansi stomata tertinggi diperoleh pada jarak tanam lebar (j_3), baik secara mandiri maupun dalam interaksi dengan AS. Sementara itu, kerapatan stomata dipengaruhi secara mandiri oleh jarak tanam sempit (j_1) serta MeJA yang tidak berbeda nyata dengan kontrol, dan interaksi terbaik ditunjukkan oleh $j_1 \times h_2$. Secara keseluruhan, pengaturan jarak tanam dan aplikasi fitohormon SA serta MeJA berpotensi dioptimalkan sebagai strategi budidaya untuk meningkatkan respons fisiologis tanaman secang secara lebih efektif.

PENDAHULUAN

Tanaman secang (*Caesalpinia sappan* L.) adalah salah satu tanaman obat yang memiliki banyak manfaat bagi manusia. Tanaman secang merupakan tanaman tropis yang banyak ditemukan di Asia Tenggara (Thanayutsiri *et al.*, 2023), Afrika dan Amerika (Uddin *et al.*, 2015). Organ target tanaman secang terdapat pada batangnya. Secara khusus, tanaman secang memiliki beragam bahan aktif yang terkonsentrasi pada empulur batangnya (Rosniawaty dkk., 2024a). Tanaman secang dikenal memiliki berbagai aktivitas farmakologis seperti analgesik, antimalaria, antiinflamasi, antidiabetes, antioksidan, dan antimikroba berkat kandungan metabolit sekundernya yang beragam, termasuk senyawa fenolik, flavonoid, asam fenolat, antrakuinon, triterpenoid, steroid, alkaloid, saponin, dan tanin, dengan brazilin sebagai komponen utama yang memiliki struktur uniknya (Nguyen *et al.*, 2020; Settharaksa *et al.*, 2019; Vij *et al.*, 2023). Besarnya potensi yang dimiliki tanaman secang, maka diperlukan upaya pengelolaan dan budidaya yang tepat untuk mengoptimalkan pertumbuhan, produksi, serta kandungan metabolit sekundernya. Upaya tersebut dapat dilakukan melalui pengaturan faktor agronomis, seperti jarak tanam, serta faktor biokimia, seperti penerapan zat pengatur tumbuh atau fitohormon yang berperan dalam mengatur proses fisiologis tanaman.

Jarak tanam adalah salah satu teknik budidaya yang dapat berpengaruh langsung terhadap proses fisiologis tanaman. Pengaturan jarak tanam menentukan tingkat kompetisi antar individu dalam memanfaatkan sumber daya seperti cahaya, air, dan unsur hara, yang pada akhirnya akan memengaruhi respons tanamannya. Perbedaan kepadatan tanaman memengaruhi kondisi iklim mikro dan makro yang mendukung pertumbuhan tanaman (Godara *et al.*,

2023). Jarak tanam memengaruhi distribusi cahaya di dalam kanopi, yang penting untuk fotosintesis. Pada jarak tanam yang lebih rapat, cahaya matahari yang diterima tanaman bisa menjadi faktor pembatas untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman sehingga dapat memengaruhi produksi biomassa tanaman (Nardini *et al.*, 2021). Sebaliknya, jarak tanam lebar (kepadatan rendah) dapat mengurangi kompetisi antar tanaman, memungkinkan pertumbuhan daun lebih luas serta penyerapan hara yang lebih baik per tanaman. Menurut Rosniawaty *et al.* (2024b), penggunaan jarak tanam yang lebih luas mendukung pertumbuhan tanaman secang karena mengurangi kompetisi antar tanaman, tetapi di sisi lain dapat mengakibatkan efisiensi pemanfaatan lahan menjadi rendah. Dengan demikian, jarak tanam optimal merupakan keseimbangan antara tingkat kompetisi dan efisiensi penggunaan lahan.

Pengaruh jarak tanam terhadap pertumbuhan tanaman pinus menunjukkan bahwa jarak tanam 3 m \times 3 m secara signifikan menunjukkan hasil yang lebih tinggi pada parameter tinggi tanaman dan diameter batang dibandingkan dengan jarak tanam 1,5 m \times 1,5 m (Hébert *et al.*, 2016). Pada tanaman keras lainnya, seperti jati yang diberi perlakuan jarak tanam 3 m \times 3 m mampu menghasilkan pohon dengan diameter lebih besar, namun memiliki tinggi batang yang lebih pendek dan jumlah cabang yang lebih banyak, jika dibandingkan dengan tanaman jati dengan jarak tanam 2 m \times 2 m (Wahyudi dkk., 2014). Hal ini sejalan dengan penelitian (Zahabu *et al.*, 2015) yang menyebutkan bahwa tinggi tanaman, diameter batang, dan riap volume pohon jati meningkat seiring dengan semakin lebarnya jarak tanam, yang mana pada tanaman jati berumur 14 tahun jarak tanam 3 m \times 3 m menghasilkan riap volume lebih tinggi dibandingkan dengan jarak tanam 2 m \times 2 m dan 4 m \times 4 m. Namun demikian, pada tanaman secang berumur tiga bulan setelah tanam, jarak tanam 1 m \times

1 m menghasilkan hasil terbaik dalam hal tinggi tanaman dan diameter batang (Rosniawaty *et al.*, 2024b). Perbedaan respons pertumbuhan tersebut menunjukkan bahwa jarak tanam memengaruhi karakter morfologis seperti tinggi dan diameter batang, dan mengubah struktur tajuk tanaman dan intensitas cahaya yang diterima, yang selanjutnya berpotensi memengaruhi respons fisiologis pada tanaman secang.

Teknik budidaya lainnya, seperti aplikasi fitohormon berupa asam salisilat (AS) dan metil jasmonat (MeJA) diketahui dapat memengaruhi respons fisiologis tanaman. Pemberian hormon eksogen bagi tanaman dapat memicu atau menginduksi respons terhadap pertumbuhan dan pertahanan pada tanaman terhadap serangan patogen atau stress lingkungan. Asam salisilat berperan penting dalam mengatur pertumbuhan, perkembangan, pematangan dan respons pertahanan tanaman (Yang *et al.*, 2023). Asam salisilat juga turut berperan dalam mengatur berbagai proses fisiologis pada tanaman. Peran AS dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman, tergantung pada konsentrasi, kondisi pertumbuhan, dan tahap perkembangan tanaman (Vicente & Plasencia, 2011). Secara umum, konsentrasi AS yang tinggi menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman, namun aplikasi AS pada konsentrasi optimal menunjukkan efek menguntungkan pada pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Penelitian yang dilakukan oleh Gowda *et al.* (2023) menunjukkan bahwa aplikasi SA 200 ppm dapat meningkatkan kandungan klorofil daun pada tanaman sambiloto (*Andrographis paniculata*).

Fitohormon lainnya seperti metil jasmonat, berperan penting dalam respons tanaman terhadap stress abiotik dan biotik (Wang *et al.*, 2021). Jasmonat, termasuk di dalamnya metil jasmonat berperan dalam berbagai proses fisiologis dan biokimiawi pada pertumbuhan dan perkembangan tanaman, mulai dari perkecambahan dan perkembangan biji, pertumbuhan daun dan penuaan (*senescence*) (Farhangi-Abri & Ghassemi-Golezani, 2019). Aplikasi fitohormon berupa MeJA pada tanaman bunga matahari, tomat dan kedelai dengan konsentrasi 2,5 mM menyebabkan penurunan signifikan pada tinggi tanaman (hingga 39%) dan biomassa (hingga 79%), namun terjadi peningkatan pada kepadatan trikoma daun (1,3–3,5 kali lebih tinggi) pada ketiga spesies, meningkatkan kandungan relatif senyawa fenolik dan kutin dalam kutikula daun, menurunkan kandungan relatif polisakarida,

meningkatkan ketebalan kutikula pada tomat tetapi menurunkannya pada bunga matahari dan kedelai (Li *et al.*, 2018).

Penelitian yang dilakukan oleh Rosniawaty dkk. (2024a) mengkaji peran MeJA dan SA dalam mengatur pertumbuhan tanaman secang. Temuan menunjukkan bahwa aplikasi MeJA pada konsentrasi 50 μM dan SA pada konsentrasi yang sama secara terpisah efektif dalam memengaruhi jumlah daun tanaman secang pada umur 12 dan 14 minggu setelah tanam. Meskipun perlakuan dengan asam salisilat 50 μM menghasilkan bobot kering bibit secang tertinggi, penggunaan hormon-hormon tersebut belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan tinggi tanaman dan diameter batang.

Penggunaan teknik budidaya pengaturan jarak tanam dan aplikasi fitohormon diharapkan dapat menghasilkan pengaruh yang positif bagi tanaman secang. Melalui pengaturan jarak tanam yang optimal, diharapkan dapat memberi ruang bagi tanaman untuk mendapatkan cahaya, air dan nutrisi dengan cukup, sedangkan aplikasi fitohormon seperti MeJA dan AS dapat membantu proses fisiologis di dalam tanaman agar berjalan lebih efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji respons fisiologis tanaman secang terhadap interaksi jarak tanam dan aplikasi fitohormon AS dan MeJA, khususnya pada karakter fisiologis seperti indeks klorofil daun, konduktansi stomata, dan kerapatan stomata.

BAHAN DAN METODE

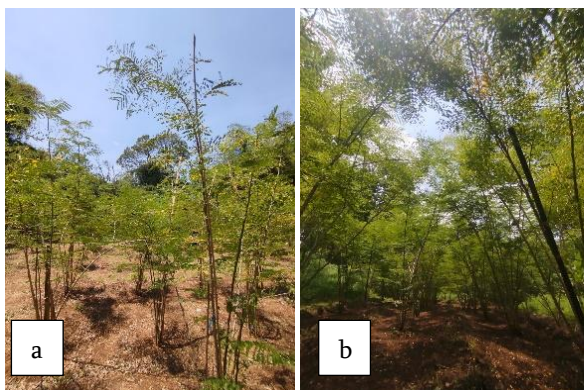
Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Kebun Percobaan Ciparanje dan Laboratorium Pangan dan Perkebunan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran dengan ketinggian tempat 796-803 mdpl. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli hingga Desember 2024.

Prosedur Penelitian

Bahan tanaman yang digunakan pada percobaan ini adalah tanaman secang berumur 16 bulan hingga 24 bulan sebanyak 108 tanaman yang telah ditanam di lokasi percobaan Kebun Ciparanje Universitas Padjadjaran (Gambar 1). Tanaman yang digunakan adalah tanaman yang berumur 16-24 bulan. Tanaman tersebut sudah ditanam di Ciparanje, dengan benih yang berasal dari Desa Banyuurip, Kecamatan Senori, Kabupaten Tuban, Jawa Timur. Aplikasi hormon eksogen dilakukan tiga hari setelah penyiangan gulma dengan interval dua minggu

sekali. Larutan *stock* hormon eksogen AS dengan konsentrasi 200 ppm dibuat dari bentuk padatan yang dilarutkan menggunakan NaOH dan akuades untuk meningkatkan kelarutannya (Marques *et al.*, 2020), sedangkan MeJA (100 ppm) diencerkan dari bentuk cair menggunakan akuades. Aplikasi dilakukan secara *foliar spray* setelah kalibrasi volume semprot pada kisaran 30–50 cm tinggi batang, dengan volume larutan sebanyak 50 mL per tanaman. Pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) gulma, hama dan patogen dilakukan secara mekanik di dalam pemeliharaan tanaman.



Gambar 1. Tanaman secang pada plot percobaan dengan jarak tanam 2 m × 2 m (a) tanaman secang berumur 16 bulan, (b) tanaman secang berumur 24 bulan.

Variabel Pengamatan

Indeks Klorofil Daun (SPAD)

Pengukuran dilakukan dengan menggunakan instrumen klorofilmeter model ANDRU Hm-Yd. Proses pengamatan dilakukan secara berkala setiap empat minggu sekali, pada pengamatan pendahuluan (ke-0), pengamatan ke-1, ke-2, ke-3 dan ke-4. Objek pengamatan difokuskan pada daun tanaman yang telah mencapai tahap pembukaan sempurna, yaitu daun yang terletak pada posisi tiga hingga empat helai daun di bawah tunas apikal. Daun yang diamati adalah daun sehat yang tidak menunjukkan adanya serangan OPT, tidak layu dan tidak menggulung. Sebanyak 3–5 daun per tanaman dipilih dari sisi tajuk yang berbeda. Pada setiap daun dilakukan 2–3 kali pembacaan menggunakan klorofilmeter, kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh nilai SPAD per tanaman. Ukuran anak daun secang lebih kecil dibandingkan jendela sensor klorofilmeter, sehingga pengukuran dilakukan dengan menjepit dua anak daun yang berdampingan pada satu tangkai daun yang sama hingga seluruh permukaan sensor tertutup.

Nilai Konduktansi Stomata (mmol H₂O m²/s)

Indeks konduktansi stomata daun tanaman secang diukur menggunakan porometer SC-1. Pengamatan dilakukan setiap empat minggu sekali. Pengamatan dilakukan pada 0 MSP hingga 16 MSP dengan interval empat mingguan (pengamatan ke-0 hingga ke-4). Pengukuran dilakukan pada daun tanaman yang telah berkembang penuh, ditandai dengan letaknya yang berada beberapa ruas di bawah tunas baru, yakni pada daun ke-3 hingga ke-4. Pengukuran porometer bersifat non-destruktif, sehingga daun tetap utuh setelah pengukuran. Pengukuran dilakukan pada daun yang sama dengan pengamatan indeks klorofil (SPAD).

Kerapatan Stomata (Jumlah Stomata/mm²)

Pengamatan kerapatan stomata dilakukan saat tanaman secang berumur 18 bulan dan 24 bulan. Pengamatan dilakukan dengan bantuan mikroskop digital okuler Olympus c34 dengan pembesaran minimal 40 × 10. Pengamatan kerapatan stomata dilakukan pada permukaan abaksial (bagian bawah daun). Sampel daun diambil dari daun sehat berwarna hijau tanpa gejala klorosis, nekrosis, atau kerusakan mekanis. Daun yang dipilih merupakan daun ke-3 hingga ke-5 dari pucuk pada tajuk bagian tengah tanaman. Sebanyak 3 daun dipilih per tanaman dari sisi tajuk yang berbeda. Sampel daun diambil pada pagi hari dan segera dimasukkan ke dalam box pendingin yang telah diberi *ice pack* untuk menjaga kesegaran dan mencegah perubahan struktur jaringan daun sebelum analisis. Sampel kemudian dibawa ke laboratorium dan dianalisis pada hari yang sama. Pengamatan kerapatan stomata mengacu pada prosedur yang dijelaskan oleh Meidner & Mansfield (1986) dengan menggunakan selulosa asetat (cat kuku transparan) dan selotip transparan sebagai metode cetaknya. Jumlah stomata dihitung per satuan luas (mm²) dan dirata-ratakan untuk memperoleh nilai kerapatan stomata pada tanaman secang.

Intensitas Cahaya

Pengamatan intensitas cahaya sebagai parameter penunjang dilakukan dengan menggunakan alat *luxmeter*. Setiap kali pengamatan dilakukan pada kisaran jam 11.00–13.00. Pengukuran intensitas cahaya dilakukan dengan interval empat minggu sekali, mengikuti waktu pengamatan parameter fisiologis lainnya. Pengukuran dilakukan di bawah kanopi daun (telah saling menaungi), yang merepresentasikan kondisi mikroklimat yang diterima daun. Intensitas cahaya diukur

menggunakan lux meter dan dikonversi ke *Photosynthetic Photon Flux Density* (PPFD) berdasarkan faktor kalibrasi 0,0185 (diasumsikan untuk spektrum cahaya matahari penuh), sehingga PPFD dinyatakan dalam $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Apogee Instruments, 2026.; Mazzelli *et al.*, 2020).

Analisis Data

Rancangan percobaan yang digunakan adalah Rancangan Petak Terbagi (RPT) dengan jarak tanam sebagai petak utama yang terdiri atas tiga taraf dan aplikasi hormon eksogen sebagai anak petak yang terdiri atas tiga taraf. Kombinasi perlakuan menghasilkan sembilan kombinasi yang masing-masing diulang tiga kali, sehingga diperoleh 27 unit percobaan.

Petak utama yaitu jarak tanam (J) yang terdiri dari tiga taraf:

j_1 = Jarak tanam 1 x 1 m

j_2 = Jarak tanam 2 x 2 m

j_3 = Jarak tanam 3 x 3 m

Adapun anak petak, yaitu aplikasi hormon eksogen (H) yang terdiri dari 3 taraf:

h_0 = tanpa aplikasi hormon eksogen

h_1 = aplikasi hormon eksogen asam salisilat 200 ppm

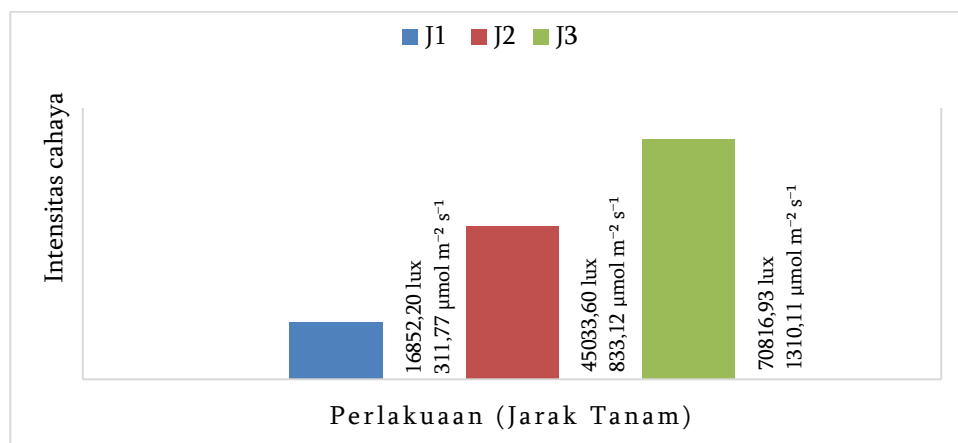
h_2 = aplikasi hormon eksogen metil jasmonat 100 ppm

Analisis data dilakukan dengan menggunakan analisis ragam pada taraf nyata 5% dilanjutkan dengan uji lanjut jarak berganda Duncan pada taraf 5% untuk menguji perbedaan antar perlakuan yang diujikan. Analisis data dilakukan dengan menggunakan *Microsoft Office Excel* dengan program SmartstatXL.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya berperan penting dalam mengatur berbagai respons fisiologis pada tanaman, seperti fotosintesis dan pembukaan stomata. Intensitas cahaya adalah salah satu faktor penting yang memengaruhi efisiensi fotosintesis pada tanaman (Saputri dkk., 2025). Kemampuan daun dalam memanfaatkan cahaya secara efisien dapat memengaruhi pembentukan struktur dan fungsi fisiologis tanaman secara berbeda (Yustiningsih, 2019). Variasi intensitas cahaya yang diamati sepanjang periode penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Intensitas cahaya selama penelitian pada jarak tanam yang berbeda. j_1 = jarak tanam 1 m x 1 m, j_2 = jarak tanam 2 m x 2 m, j_3 = jarak tanam 3 m x 3 m.

Berdasarkan Gambar 2, hasil pengukuran menunjukkan bahwa intensitas cahaya yang diterima tanaman secang meningkat seiring dengan bertambah lebarnya jarak tanam. Perlakuan j_1 (1 m x 1 m) memiliki intensitas cahaya terendah yaitu 16.852,20 lux, atau setara dengan $311,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sedangkan j_2 (2 m x 2 m) mencapai 45.033,6 lux setara dengan $833,12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, dan nilai tertinggi terdapat pada j_3 (3 m x 3 m) sebesar 70.816,93 lux ($1310,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Peningkatan ini

menunjukkan bahwa semakin lebar jarak antar tanaman, semakin besar pula jumlah cahaya yang dapat menembus kanopi dan mencapai permukaan daun. Perbedaan intensitas cahaya tersebut berkaitan erat dengan tingkat penutupan tajuk dan kompetisi antar tanaman dalam memanfaatkan sumber daya cahaya. Pada jarak tanam yang rapat (j_1), tajuk tanaman saling menaungi sehingga mengurangi jumlah cahaya yang diterima oleh daun bagian bawah. Sebaliknya, pada jarak tanam yang lebih lebar

(j₃), ruang antar tanaman lebih terbuka sehingga distribusi cahaya lebih merata. Menurut Wu *et al.* (2024), intensitas cahaya, fotoperiodisme dan kualitas cahaya secara signifikan memengaruhi regulasi proses fisiologis seperti pembelahan dan diferensiasi sel, sintesis klorofil, pertumbuhan jaringan dan mengatur pembukaan stomata, sehingga akan menentukan efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

Indeks Klorofil Daun pada Tanaman Secang

Indeks klorofil daun merupakan parameter fisiologis penting yang menggambarkan kapasitas fotosintesis dan status nutrisi nitrogen tanaman. Pengaruh mandiri aplikasi jarak tanam dan fitohormon dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan pengaruh interaksi kedua perlakuan terhadap indeks

klorofil daun pada pengamatan ke-1 dan ke-3 dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3. Berdasarkan Tabel 1, pada pengamatan ke-0, ke-2, dan ke-4 aplikasi jarak tanam tidak memengaruhi indeks klorofil daun. Indeks klorofil daun dipengaruhi oleh pengaturan jarak tanam yang menentukan intensitas penyinaran dan tingkat pencahayaan antar tanaman. Jarak tanam yang rapat meningkatkan pencahayaan sehingga menurunkan cahaya yang diterima daun (Gambar 2). Kondisi iklim mikro yang terbentuk akibat perbedaan jarak tanam diduga berperan dalam memengaruhi indeks klorofil daun. Menurut Malekzadeh *et al.* (2024), cahaya berperan penting dalam meningkatkan aktivitas fotosintesis tanaman, memaksimalkan penyerapan energi cahaya, serta memengaruhi respons tanaman terhadap regulasi fotosintesis.

Tabel 1. Pengaruh mandiri jarak tanam dan hormon eksogen terhadap indeks klorofil daun tanaman secang

Perlakuan	Indeks klorofil daun		
	Pengamatan ke-		
	0	2	4
J			
J ₁ (1 m × 1 m)	46,46 ± 2,89 a	42,36 ± 0,90 a	45,21 ± 1,05 a
J ₂ (2 m × 2 m)	46,94 ± 1,56 a	42,72 ± 0,68 a	45,88 ± 1,39 a
J ₃ (3 m × 3 m)	47,22 ± 2,12 a	41,77 ± 0,84 a	45,84 ± 0,60 a
H			
H ₀ (kontrol)	45,21 ± 2,24 a	41,50 ± 0,71 a	45,89 ± 1,27 a
H ₁ (AS)	46,33 ± 2,85 a	44,37 ± 0,53 b	45,83 ± 0,76 a
H ₂ (MeJA)	49,08 ± 1,08 a	40,98 ± 0,63 a	45,21 ± 1,09 a

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 5%.

Pada pengamatan ke-1 secara mandiri, aplikasi AS memberikan hasil terbaik terhadap pengamatan ke-2 terhadap indeks klorofil daun. Aplikasi asam salisilat secara eksogen telah terbukti dapat meningkatkan kandungan klorofil dan memperbaiki efisiensi fotosintesis pada berbagai jenis tanaman, seperti pada aplikasi AS dapat meningkatkan kandungan klorofil pada tanaman sambiloto (Gowda *et al.*, 2023). Pemberian asam salisilat pada beberapa tanaman yang memiliki manfaat farmakologis pada tanaman seperti *Pistacia chinensis* (Song *et al.*, 2020), dan *Galanthus elwesii* (Kırgeç *et al.*, 2023) terbukti meningkatkan kadar klorofil dibandingkan dengan tanaman tanpa perlakuan, yang menunjukkan adanya pengaruh langsung dalam merangsang sintesis klorofil. Pada penelitian yang dilakukan oleh Wang *et al.* (2022) tanaman *chinese chive* (*Allium tuberosum* Rottler ex Spreng) menunjukkan bahwa

bahwa kandungan total klorofil setelah perlakuan 500 µM metil jasmonat (MeJA) meningkat secara signifikan dibandingkan tanpa pemberian fitohormon.

Pada pengamatan awal (Tabel 2), indeks klorofil daun tanaman dipengaruhi oleh interaksi jarak tanam dan perlakuan hormon eksogen. Secara umum, nilai indeks klorofil berada pada kisaran 49,88–56,18. Interaksi antara j₂ × h₁ dan j₂ × h₂ memberikan pengaruh terbaik dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Sementara itu, berdasarkan Tabel 3 secara horizontal, pada j₁ hormon h₁ kembali memberikan nilai tertinggi (53,43) dibanding h₀ (51,38) dan h₂ (49,84). Pada j₂ terlihat bahwa perlakuan h₂ berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Pada j₃, semua perlakuan fitohormon tidak berbeda nyata satu dengan lainnya. Secara vertikal, pada h₀ nilai klorofil tidak

berbeda nyata antar jarak tanam. Pada h_1 , terlihat (48,50). Sementara pada h_2 , ketiganya tidak bahwa j_1 (53,43) lebih besar dari j_3 (51,37) dan j_2 menunjukkan hasil yang berbeda nyata.

Tabel 2. Pengaruh interaksi jarak tanam dan hormon eksogen terhadap indeks klorofil daun tanaman secang pada pengamatan ke-1

Jarak Tanam, J	Fitohormon, H		
	H ₀ (kontrol)	H ₁ (AS)	H ₂ (MeJA)
J ₁ (1 m × 1 m)	50,39 ± 2,27 a AB	46,21 ± 2,16 a A	50,90 ± 1,07 a B
J ₂ (2 m × 2 m)	49,41 ± 0,41 a A	55,95 ± 1,28 b B	56,18 ± 1,85 b B
J ₃ (3 m × 3 m)	49,07 ± 1,13 a A	51,65 ± 1,23 b A	49,88 ± 0,27 a A

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 5%. Huruf kecil dibaca arah vertikal, membandingkan antara 2 Jarak Tanam pada Fitohormon yang sama. Huruf kapital dibaca arah horizontal, membandingkan antara 2 Fitohormon pada Jarak Tanam yang sama.

Jarak tanam yang optimal memastikan tanaman memperoleh cahaya optimal, sehingga respons positif dari aplikasi fitohormon terhadap peningkatan klorofil dapat dimaksimalkan. Kepadatan tanaman yang optimal memberikan pengaruh yang baik pada pertumbuhan baik secara individu maupun dalam satu populasi melalui pemanfaatan koordinasi air, cahaya, suhu, dan nutrisi yang terdistribusi dengan baik (Ning *et al.*, 2019). Dengan ruang tumbuh yang cukup dan dukungan fitohormon seperti AS dan MeJA, tanaman

berpotensi dapat meningkatkan indeks klorofil daun, fotosintesis yang lebih efisien, dan pertumbuhan yang lebih baik. Pada jarak tanam yang lebih rapat, intensitas cahaya yang diterima tiap daun cenderung menurun akibat meningkatnya naungan antar tanaman. Intensitas cahaya yang rendah dapat menurunkan laju fotosintesis, sehingga menghambat akumulasi CO₂ dan mengakibatkan penurunan laju pertumbuhan biomassa tanaman (Kong *et al.*, 2016). Kondisi ini dapat menurunkan laju fotosintesis jika tidak diimbangi dengan mekanisme adaptif.

Tabel 3. Pengaruh interaksi jarak tanam dan hormon eksogen terhadap indeks klorofil daun tanaman secang pada pengamatan ke-3

Jarak Tanam, J	Fitohormon, F		
	H ₀ (kontrol)	H ₁ (AS)	H ₂ (MeJA)
J ₁ (1 m × 1 m)	51,38 ± 1,76 a A	53,43 ± 0,88 b A	49,89 ± 1,46 a A
J ₂ (2 m × 2 m)	49,98 ± 0,51 a A	48,50 ± 0,99 a A	53,73 ± 1,15 a B
J ₃ (3 m × 3 m)	49,67 ± 0,73 a A	51,37 ± 1,67 ab A	50,23 ± 2,09 a A

Keterangan: J = Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 5%. Huruf kecil dibaca arah vertikal, membandingkan antara 2 Jarak Tanam pada Fitohormon yang sama. Huruf kapital dibaca arah horizontal, membandingkan antara 2 Fitohormon pada Jarak Tanam yang sama.

Kombinasi antara jarak tanam yang tepat dan aplikasi MeJA maupun AS menciptakan kondisi iklim mikro dan fisiologis yang lebih seimbang, sehingga dapat mendukung peningkatan aktivitas fotosintesis. Asam salisilat meningkatkan aktivitas enzim antioksidan seperti Superoksida Dismutase (SOD), Katalase (CAT), dan Askorbat Peroksidase (APX), yang berperan melindungi klorofil dari kerusakan oksidatif serta mendukung kesehatan

tanaman secara keseluruhan saat mengalami stres (Ahanger *et al.*, 2020; Moustafa-Farag *et al.*, 2020; Naz *et al.*, 2022). Selain itu, asam salisilat juga memperbaiki parameter fotosintesis seperti laju transport elektron dan efisiensi fotokimia, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman yang lebih baik (Moustafa-Farag *et al.*, 2020). Aplikasi MeJA berperan dalam jalur pertahanan tanaman dan produksi metabolit

sekunder daripada dalam mendukung pertumbuhan primer seperti peningkatan klorofil dan nitrogen. Metil Jasmonat diketahui menginduksi biosintesis metabolit sekunder, seperti alkaloid, flavonoid, dan terpenoid, yang berfungsi sebagai mekanisme pertahanan terhadap patogen dan herbivora (Reyes-Díaz *et al.*, 2016).

Nilai Konduktansi Stomata

Konduktansi stomata menunjukkan efisiensi pertukaran gas pada daun yang berkaitan dengan laju fotosintesis dan transpirasi tanaman. Nilai konduktansi stomata memiliki keterkaitan yang erat dengan laju fotosintesis (Soleh *et al.*, 2016, 2017). Konduktansi stomata merupakan salah satu sifat fisiologis utama tanaman yang perlu diperhatikan karena stomata berperan sebagai pintu masuk dan keluarnya gas, termasuk CO₂ yang penting dalam proses fotosintesis (Soleh dkk., 2021). Pembukaan stomata terjadi ketika sel penjaga mengalami peningkatan tekanan turgor akibat masuknya air, sedangkan penutupan stomata berlangsung saat tekanan turgor menurun akibat keluarnya air dari sel penjaga (Yang *et al.*, 2020).

Pengaruh mandiri jarak tanam dan fitohormon terhadap nilai konduktansi stomata dapat dilihat pada Tabel 4. Secara umum, j₃ (jarak tanam lebar, 3 m × 3 m) menghasilkan konduktansi stomata tertinggi pada pengamatan ke-2 dan ke-4. Sebaliknya, j₁ (jarak rapat, 1 m × 1 m) selalu menunjukkan nilai terendah, dan berbeda nyata dengan j₃ pada pengamatan ke-2 dan ke-4. Hal ini menunjukkan bahwa jarak tanam lebar memberi ruang lebih baik bagi tanaman untuk membuka stomata, diduga karena intensitas cahaya, ketersediaan CO₂, dan kelembapan mikro lebih optimal. Namun, berbeda halnya dengan aplikasi fitohormon tidak menunjukkan perbedaan yang nyata pada setiap pengamatan. Nilai P-value menunjukkan pada pengamatan ke-0, 1, 2, dan 4, tidak ada perbedaan nyata antar kombinasi J × H (p > 0,05), sedangkan pada pengamatan ke-3 menunjukkan ada pengaruh nyata (p = 0,049), artinya kombinasi jarak tanam dan hormon berinteraksi dalam memengaruhi konduktansi stomata. Pengaruh interaksi jarak tanam dengan fitohormon pada pengamatan ke-3 dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 4. Pengaruh mandiri jarak tanam dan hormon eksogen terhadap konduktansi stomata pada daun tanaman secang

Perlakuan	Konduktansi stomata (mmol H ₂ O/ m ² s)			
	Pengamatan ke-			
	0	1	2	4
J				
J ₁ (1 m × 1 m)	385,01 ± 71,77 a	404,26 ± 34,17 a	404,48 ± 61,67 a	456,81 ± 60,19 a
J ₂ (2 m × 2 m)	524,26 ± 71,87 a	495,18 ± 49,32 a	636,17 ± 37,81 ab	678,03 ± 37,90 ab
J ₃ (3 m × 3 m)	592,44 ± 68,04 a	534,23 ± 47,72 a	730,93 ± 62,52 b	793,20 ± 73,37 b
H				
H ₀ (kontrol)	519,56 ± 80,98 a	485,92 ± 43,36 a	553,74 ± 45,06 a	601,19 ± 44,06 a
H ₁ (AS)	471,90 ± 79,34 a	440,37 ± 41,78 a	591,35 ± 95,26 a	652,30 ± 104,69 a
H ₂ (MeJA)	510,25 ± 68,75 a	507,39 ± 55,41 a	626,49 ± 68,96 a	674,54 ± 67,04 a

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 5%.

Jarak tanam yang lebih lebar seperti pada j₃ memungkinkan tanaman mendapatkan pencahayaan, ruang tumbuh dan kelembapan tanah yang lebih optimal, sehingga stomata dapat membuka lebih lebar. Sebaliknya, j₁ menunjukkan adanya kompetisi antar tanaman dalam mendapatkan cahaya, air dan nutrisi yang diduga memicu penutupan stomata sebagai respons terhadap cekaman. Perbedaan kepadatan tanaman memengaruhi kondisi iklim mikro dan makro yang mendukung pertumbuhan tanaman (Godara *et al.*,

2023). Jarak tanam memengaruhi distribusi cahaya di dalam kanopi, yang penting untuk fotosintesis.

Berdasarkan Gambar 2, intensitas cahaya yang terdapat pada j₃ lebih tinggi dibandingkan intensitas cahaya yang terdapat pada j₁. Hal ini yang menyebabkan konduktansi tanaman secang pada j₃ lebih tinggi dibandingkan j₁ dan j₂. Pada tanaman legum lainnya seperti kedelai, nilai konduktansi stomata yang tinggi dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang tinggi karena tanaman dalam kondisi tanpa naungan (Bestari dkk., 2018). Peningkatan nilai

konduktansi stomata menunjukkan bahwa tanaman berada dalam kondisi fisiologis yang optimal untuk menjalankan proses metabolisme dan fotosintesis (Soleh dkk., 2020).

Tabel 5. Pengaruh interaksi jarak tanam dan hormon eksogen terhadap konduktansi stomata pada daun tanaman secang pengamatan ke-3

Jarak Tanam, J	Fitohormon, H		
	H ₀ (kontrol)	H ₁ (AS)	H ₂ (MeJA)
J ₁ (1 m × 1 m)	499,66 ± 104,10 a A	342,03 ± 92.46 a A	462,68 ± 134,03 a A
J ₂ (2 m × 2 m)	638,05 ± 33,83 a A	589,23 ± 36.45 a A	760,61 ± 100,89 a A
J ₃ (3 m × 3 m)	596,45 ± 78,87 a A	946,04 ± 126.28 b B	752,98 ± 38,86 a AB

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 5%. Huruf kecil dibaca arah vertikal, membandingkan antara 2 Jarak Tanam pada Fitohormon yang sama. Huruf kapital dibaca arah horizontal, membandingkan antara 2 Fitohormon pada Jarak Tanam yang sama.

Tabel 5 menunjukkan pengaruh interaksi jarak tanam dan fitohormon terhadap konduktansi stomata daun tanaman pada pengamatan ke-3. Nilai rata-rata berkisar antara ±342,03 hingga ±946,04 mmol H₂O m⁻² s⁻¹. Interaksi j₃ × h₁ memberikan pengaruh terbaik dibandingkan dengan perlakuan lainnya, namun tidak menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada pemberian fitohormon metil jasmonat (h₂) pada jarak tanam 3 × 3 m (j₃). Peningkatan lebar jarak tanam yang menyebabkan tingginya intensitas cahaya pada kanopi tanaman, berinteraksi dengan aktivitas fitohormon dalam mengatur mekanisme fisiologis daun, khususnya dalam pengendalian indeks konduktansi stomata. Cahaya berperan tidak hanya sebagai sumber energi bagi fotosintesis, tetapi juga sebagai sinyal penting dalam pengaturan pergerakan stomata selama transisi dari kondisi gelap ke terang (Yang *et al.*, 2020). Cahaya, terutama cahaya merah dan biru, berperan ganda sebagai sumber energi fotosintesis dan sinyal pembuka stomata (Hosotani *et al.*, 2021). Aktivasi fotosintesis oleh cahaya meningkatkan konsumsi CO₂ di mesofil, sehingga menurunkan *intercellular space* (Ci) (Pankasem *et al.*, 2024). Penurunan konsentrasi CO₂ di ruang antar sel akibat fotosintesis yang meningkat menjadi sinyal bagi sel penjaga stomata untuk membuka pori-pori lebih lebar, meningkatkan konduktansi stomata (Sakoda *et al.*, 2020). Pemberian AS dapat meningkatkan indeks konduktansi stomata pada tanaman (Lotfi *et al.*, 2020). Asam salisilat mengurangi akumulasi Na⁺ serta meningkatkan penyerapan dan transportasi K⁺ ke daun dan akar melalui aktivasi H⁺-ATPase pada membran plasma, sehingga mendukung penyerapan K⁺, penghambatan

akumulasi Na⁺, dan menjaga rasio K⁺/Na⁺ tetap tinggi (Fairoj *et al.*, 2023).

Kerapatan Stomata

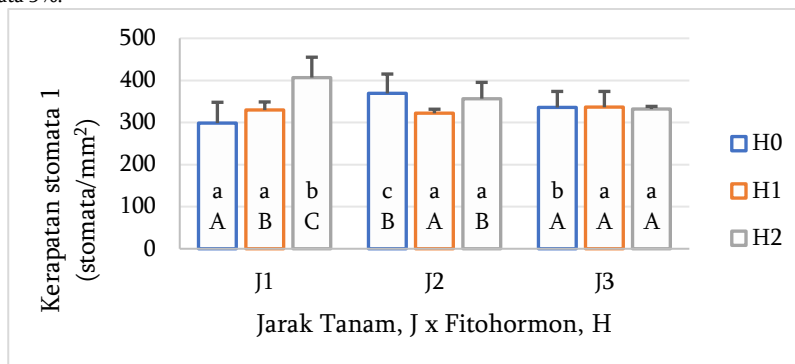
Kerapatan stomata diamati untuk mengevaluasi adaptasi fisiologis tanaman terhadap lingkungan, karena jumlah stomata memengaruhi pengaturan pertukaran gas dan kehilangan air. Terdapat pengaruh mandiri dan interaksi antara jarak tanam dan fitohormon terhadap kerapatan stomata yang dapat dilihat pada Tabel 6. Berdasarkan Tabel 6, pada pengamatan ke-2, jarak tanam 1 m x 1 m secara mandiri memberikan pengaruh nyata terhadap parameter kerapatan stomata. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Li *et al.* (2024) yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah stomata terjadi karena kepadatan tanaman yang tinggi, hal ini dikarenakan jarak tanam yang lebih rapat membuat stomata berukuran lebih kecil namun jumlahnya lebih banyak, khususnya pada bagian abaksial (bagian bawah daun). Apabila dibandingkan dengan parameter nilai konduktansi stomata, kerapatan stomata menunjukkan hasil yang berbeda. Penelitian yang dilakukan oleh Rindyastuti dan Hapsari (2016) menunjukkan bahwa kerapatan stomata tidak berkorelasi positif dengan konduktansi stomata, tetapi menunjukkan korelasi positif dengan laju transpirasi pada daun. Kerapatan stomata dapat mengalami perubahan sebagai respons terhadap kondisi lingkungan. Peningkatan suhu umumnya menyebabkan penurunan kerapatan stomata pada permukaan daun. Berdasarkan Gambar 3, intensitas cahaya pada j₃ lebih tinggi dibandingkan dengan j₁. Intensitas cahaya yang tinggi biasanya meningkatkan suhu lingkungan, terutama di permukaan daun.

Energi radiasi matahari tidak hanya dimanfaatkan untuk fotosintesis, tetapi juga diserap sebagai panas sehingga menaikkan suhu jaringan daun dan udara di sekitarnya. Menurut Rindyastuti dan Hapsari (2016) tingginya suhu lingkungan akan menurunkan kerapatan stomata pada daun.

Tabel 6. Pengaruh mandiri jarak tanam dan hormon eksogen terhadap kerapatan stomata pada daun tanaman secang

Perlakuan	Kerapatan stomata ke-2 (secang umur 24 bulan) (stomata/mm ²)
J	
J ₁ (1 m × 1 m)	395,56 ± 15,19 b
J ₂ (2 m × 2 m)	341,38 ± 11,70 a
J ₃ (3 m × 3 m)	334,61 ± 3,68 a
H	
H ₀ (kontrol)	381,02 ± 16,09 b
H ₁ (AS)	331,20 ± 9,60 a
H ₂ (MeJA)	359,33 ± 12,38 b

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 5%.

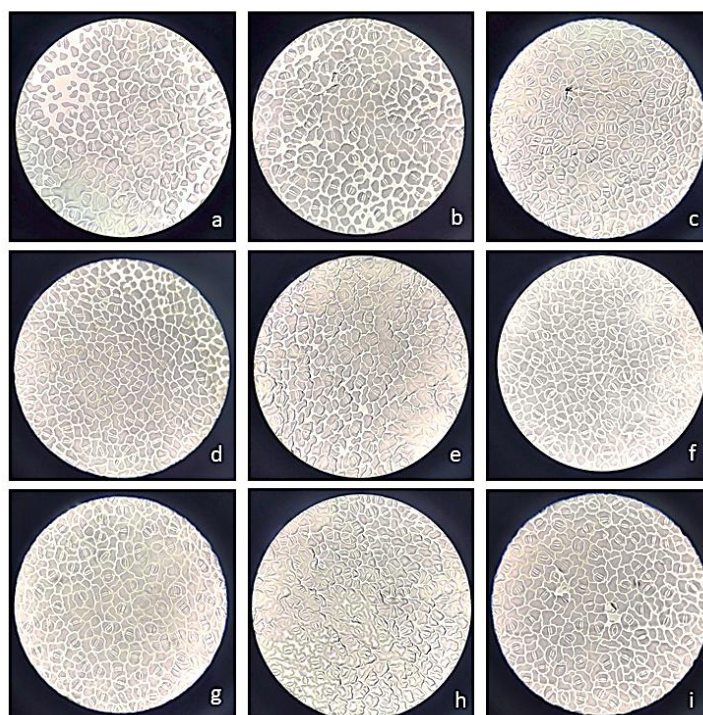


Gambar 3. Pengaruh interaksi jarak tanam dan fitohormon terhadap kerapatan stomata pada daun tanaman secang berumur 18 bulan. Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Duncan pada taraf nyata 5%. Huruf kecil membandingkan antara 2 Jarak Tanam pada Fitohormon yang sama. Huruf kapital dibaca membandingkan antara 2 Fitohormon pada Jarak Tanam yang sama.

Interaksi jarak tanam sempit (j₁) dan aplikasi MeJA (h₂) memberikan respons terbaik terhadap kerapatan stomata yaitu sebesar 406,80 ± 11,24 stomata/mm² (Gambar 3 dan Gambar 4). Hal ini

Berbeda halnya dengan nilai konduktansi stomata, aplikasi fitohormon metil jasmonat memberikan pengaruh yang nyata terhadap kerapatan stomata pada pengamatan ke-1 maupun ke-2 (Tabel 6 & Gambar 3). Hasil penelitian tentang pengaruh aplikasi metil jasmonat pada tanaman kedelai, bunga matahari, dan tomat menunjukkan bahwa MeJA menghambat pertumbuhan tanaman, tetapi MeJA dapat meningkatkan kepadatan trikoma dan kerapatan stomata pada tanaman kedelai (rata-rata peningkatan sebesar 26%) dan bunga matahari (rata-rata peningkatan sebesar 16%), sedangkan pada tanaman tomat justru mengalami penurunan kerapatan stomata (rata-rata penurunan sebesar 4,5%) dengan konsentrasi pemberian 1 mM (Li *et al.*, 2018). Terdapat interaksi antara jarak tanam dan fitohormon terhadap kerapatan stomata pada pengamatan ke-1 yang dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

menunjukkan bahwa tanaman yang ditanam lebih rapat dan diberi MeJA mengalami peningkatan kerapatan stomata sebagai bentuk adaptasi terhadap lingkungan yang kompetitif.



Gambar 4. Stomata pada berbagai perlakuan, (a) j_1h_0 = jarak tanam 1 m x 1 m + tanpa aplikasi hormon eksogen, (b) j_1h_1 = jarak tanam 1 m x 1 m + SA 200 ppm, (c) Jarak tanam 1 m x 1 m + MeJA 100 ppm, (d) j_2h_0 = Jarak tanam 2 m x 2 m + tanpa aplikasi hormon eksogen, (e) j_2h_1 = Jarak tanam 2 m x 2 m + SA 200 ppm, (f) j_2h_2 = Jarak tanam 2 m x 2 m + MeJA 100 ppm, (g) j_3h_0 = Jarak tanam 3 m x 3 m + tanpa aplikasi hormon eksogen, (h) j_3h_1 = Jarak tanam 3 m x 3 m + SA 200 ppm, (i) j_3h_2 = Jarak tanam 3 m x 3 m + MeJA 100 ppm.

SIMPULAN

Jarak tanam dan aplikasi fitohormon berupa asam salisilat dan metil jasmonat memengaruhi respons fisiologis tanaman secang, baik secara mandiri dan saling berinteraksi. Berdasarkan hasil penelitian, indeks klorofil daun secara mandiri dipengaruhi oleh asam salisilat. Interaksi terbaik diperoleh pada kombinasi jarak tanam 2 m x 2 m dan dengan metil, yang secara sinergis meningkatkan aktivitas fisiologis daun melalui stimulasi sintesis pigmen fotosintetik. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi pencahayaan dan kerapatan tanaman yang optimal pada jarak tanam sedang mendukung efisiensi fotosintesis dan penyerapan fitohormon. Sementara itu, nilai konduktansi stomata secara mandiri menunjukkan hasil terbaik pada jarak tanam lebar (3 m x 3 m). Interaksi paling efektif juga ditemukan pada kombinasi jarak tanam 3 m x 3 m dengan metil jasmonat maupun asam salisilat, yang berperan dalam mengatur keseimbangan antara penyerapan CO₂ dan efisiensi penggunaan air melalui pengendalian bukaan stomata. Adapun kerapatan stomata secara mandiri dipengaruhi oleh jarak tanam sempit (j_1) serta

perlakuan metil jasmonat. Interaksi terbaik terjadi pada kombinasi jarak tanam sempit (j_1) dengan metil jasmonat, yang diduga memperkuat respons morfofisiologis daun terhadap intensitas cahaya dan aktivitas fotosintetik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahanger, MA, RA Mir, MN Alyemeni, and P Ahmad. 2020. Combined effects of brassinosteroid and kinetin mitigates salinity stress in tomato through the modulation of antioxidant and osmolyte metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry*. 147: 31–42. DOI: 10.1016/j.plaphy.2019.12.007.
- Apogee Instruments. 2026. PPF to Lux Conversion. 2026. Apogee Instrument. Tersedia online pada: <https://www.apogeeinstruments.com/conversi-on-ppfd-to-lux/> (diakses pada 20 Februari 2026)
- Bestari, AV, S Darmanti dan S Parman. 2018. Respon fisiologis kedelai [*Glycine max* (L.) Merr. varietas Grobogan terhadap tingkat naungan

- yang berbeda. *Biospecies*. 11(2): 53–62. DOI: 10.22437/biospecies.v11i2.5715.
- Fairoj, SA, MM Islam, MA Islam, E Zaman, MB Momtaz, MS Hossain, NA Jahan, SNU Shams, TA Urmi, MA Rasel, MAR Khan, MZU Kamal, GKMM Rahman, BN Bari, MM Haque, and Y Murata. 2023. Salicylic acid improves agromorphology, yield and ion accumulation of two wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by ameliorating the impact of salt stress. *Agronomy*. 13(1): 25. DOI: 10.3390/agronomy13010025.
- Farhangi-Abri, S, and K Ghassemi-Golezani. 2019. Jasmonates: Mechanisms and functions in abiotic stress tolerance of plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 20: 1–10. DOI: 10.1016/j.bcab.2019.101210.
- Godara, M, MI Khichar, A Sharma, A Yadav, and A Jakhar. 2023. Effect of sowing time and plant spacing on microclimate profile, iPAR and yield in *Bt* cotton. *Environment and Ecology*. 41(4B): 2734–2741. DOI: 10.60151/envec/feoc3265.
- Gowda, MP, AB Sharangi, TK Upadhyay, NM Alotaibi, MO Alotaibi, N Alshammari, and M Saeed. 2023. Elicitor-mediated response of growth, yield, and quality of kalmegh (*Andrographis paniculata* Wall. ex Nees, Family Acanthaceae). *Agronomy*. 13(9): 2313. DOI: 10.3390/agronomy13092313.
- Hébert, F, C Krause C, PY Plourde, A Achim, G Prigent, and J Ménérier. 2016. Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-year-old *Pinus banksiana* plantation in the boreal forest of Quebec. *Forests*. 7(11): 5–7. DOI: 10.3390/f7110276.
- Hosotani, S, S Yamauchi, H Kobayashi, S Fuji, S Koya, KI Shimazaki, and A Takemiya. 2021. A BLUS1 kinase signal and a decrease in intercellular CO₂ concentration are necessary for stomatal opening in response to blue light. *Plant Cell*. 33(5): 1813–1827. DOI: 10.1093/plcell/koab067.
- Kırgeç, Y, E Batu-Ay, and MA Açıkgöz. 2023. The effects of foliar salicylic acid and zinc treatments on proline, carotenoid, and chlorophyll content and anti-oxidant enzyme activity in *Galanthus elwesii* Hook. *Horticulturae*. 9(9): 1041. DOI: 10.3390/horticulturae9091041.
- Kong, DX, YQ Li, ML Wang, M Bai, R Zou, H Tang, and H Wu. 2016. Effects of light intensity on leaf photosynthetic characteristics, chloroplast structure, and alkaloid content of *Mahonia bodinieri* (Gagnep.) Laferr. *Acta Physiologiae Plantarum*. 38(5). DOI: 10.1007/s11738-016-2147-1.
- Li, C, P Wang, NW Menzies, E Lombi, PM Kopittke. 2018. Effects of methyl jasmonate on plant growth and leaf properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 181(3): 409–418. DOI: 10.1002/jpln.201700373.
- Li, X, X Li, T Zhang, X Xue, Y Dai, Z Lei, and D He. 2024. High plant density optimizes leaf stomatal traits for accelerating the stomatal response rate at the lower cotton canopy. *Crop Science*. 65(1): e21443. DOI: 10.1002/csc2.21443.
- Lotfi, R, K Ghassemi-Golezani, and M Pessarakli. 2020. Salicylic acid regulates photosynthetic electron transfer and stomatal conductance of mung bean (*Vigna radiata* L.) under salinity stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 26: 101635. DOI: 10.1016/j.bcab.2020.101635.
- Malekzadeh, MR, HR Roosta, M Esmaeilzadeh, P Dabrowski, and HM Kalaji. 2024. Improving strawberry plant resilience to salinity and alkalinity through the use of diverse spectra of supplemental lighting. *BMC Plant Biology*. 24: 252. DOI: 10.1186/s12870-024-04984-y.
- Marques, TL, MK Sasaki, LC Nunes, and FRP Rocha. 2020. Flow-batch sample preparation for fractionation of the stress signaling phytohormone salicylic acid in fresh leaves. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2020: 1–8. DOI: 10.1155/2020/8865849.
- Mazzelli, A, A Cicci A, F Di Caprio F, P Altimari, L Toro, G Iaquaniello, and F Pagnanelli. 2020. Multivariate modeling for microalgae growth in outdoor photobioreactors. *Algal Research*. 45: 101663. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101663.
- Meidner, H, and TA Mansfield. 1986. *Physiology of Stomata*. McGraw Hill. London.
- Moustafa-Farag, M, HI Mohamed, A Mahmoud, A Elkelish, AN Misra, KM Guy, M Kamran, S Ai, and M Zhang. 2020. Salicylic acid stimulates antioxidant defense and osmolyte metabolism to alleviate oxidative stress in watermelons under excess boron. *Plants*. 9(6): 724. DOI: 10.3390/plants9060724.

- Nardini, C, F Schwerz, DD Neto, E Eloy, EF Elli, J Sgarbossa, LB Tibolla, L. B, D Schmidt, D, and BO Caron. 2021. Biomass and radiation use efficiency in *Eucalyptus* plantations as affected by spacing of planting. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*. 48(128): 1–14. DOI: 10.18671/SCIFOR.V48N128.19.
- Naz, S, A Bilal, B Saddiq, S Ejaz, S Ali, S, ST Ain Haider, H Sardar, B Nasir, I Ahmad, RK Tiwari, R, MK Lal, A Shakoor, MN Alyemini, N Mushtaq, and MA Altaf. 2022. Foliar application of salicylic acid improved growth, yield, quality and photosynthesis of pea (*Pisum sativum* L.) by improving antioxidant defense mechanism under saline conditions. *Sustainability (Switzerland)*. 14: 14180. DOI: 10.3390/su142114180.
- Nguyen, VB, BD Vu, GK Pham, BQ Le, VC Nguyen, C Van Men, and VT Nguyen. 2020. Phenolic compounds from *Caesalpinia sappan*. *Pharmacognosy Journal*. 12(2): 410–414. DOI: 10.5530/pj.2020.12.63.
- Ning, K, C Ding, Q Huang, W Zhang, C Yang, D Liang, R Fan, R, and X Su. 2019. Transcriptome profiling revealed diverse gene expression patterns in poplar (*Populus × euramericana*) under different planting densities. *PLoS ONE*. 14(5): e0217066. DOI: 10.1371/journal.pone.0217066.
- Pankasem, N, PK Hsu PK, BNK Lopez, PJ Franks, and JI Schroeder. 2024. Warming triggers stomatal opening by enhancement of photosynthesis and ensuing guard cell CO₂ sensing, whereas higher temperatures induce a photosynthesis-uncoupled response. *New Phytologist*. 244(5): 1847–1863. DOI: 10.1111/nph.20121.
- Reyes-Díaz, M, T Lobos, L Cardemil, A Nunes-Nesi, J Retamales, L Jaakola, M Alberdi, and A Ribera-Fonseca. 2016. Methyl jasmonate: An alternative for improving the quality and health properties of fresh fruits. *Molecules*. 21(6): 567. DOI: 10.3390/molecules21060567.
- Rindyastuti, R, dan L Hapsari. 2016. Adaptasi ekofisiologi terhadap iklim tropis kering: Studi anatomi daun sepuluh jenis tumbuhan berkayu. *Biologi Indonesia*. 13(1): 1–14.
- Rosniawaty, S, ID Bahjatien, MA Soleh, M Ariyanti, M, dan R Sudirja. 2024a. Potensi metil jasmonat dan asam salisilat sebagai elisitor dalam mempengaruhi pertumbuhan bibit tanaman secang (*Caesalpinia sappan* L.). *Agroland*. 31(1):55–62. DOI: 10.22487/agrolandnasional.v31i1.1961.
- Rosniawaty, S, FP Prasasta, M Ariyanti, IRD Anjarsari, MA Soleh, S Mubarak, and R Sudirja. 2024b. Effect of crop pattern and types of manure on the growth of Sappan wood (*Caesalpinia Sappan* L.) in Jatinangor, West Java, Indonesia. *Research on Crops*. 25(1):122–127. DOI: 10.31830/2348-7542.2024.ROC-1042.
- Sakoda, K, W Yamori W, T Shimada T, SS Sugano, I Hara-Nishimura, and Y Tanaka. 2020. Higher stomatal density improves photosynthetic induction and biomass production in arabidopsis under fluctuating light. *Frontiers in Plant Science*. 11: 589603. DOI: 10.3389/fpls.2020.589603.
- Saputri, A, MS Prayogo, dan N Faiqotun. 2025. Pengaruh intensitas cahaya terhadap laju fotosintesis pada tanaman bayam (*Amaranthus* sp.). *Flora: Jurnal Kajian Ilmu Pertanian dan Perkebunan*. 2(2): 1–13. DOI: 10.62951/flora.v2i2.312.
- Settharaksa, S, C Monton C, and L Charoenchai. 2019. Optimization of *Caesalpinia sappan* L. heartwood extraction procedure to obtain the highest content of brazilin and greatest antibacterial activity. *Journal of Integrative Medicine*. 17(5): 351–358. DOI: 10.1016/j.joim.2019.05.003.
- Soleh, MA, IRD Anjarsari, dan S Rosniawaty. 2020. Penurunan nilai konduktansi stomata, efisiensi penggunaan cahaya, dan komponen pertumbuhan akibat genangan air pada beberapa genotip tanaman tebu. *Kultivasi*. 19(2): 1114-1118. DOI: 10.24198/kultivasi.v19i2.22471.
- Soleh, MA, R Manggala, dan M Kadapi. 2021. Keragaan fisiologis dan morfologis dua varietas kedelai asal subtropis dan tropis akibat cekaman kekeringan. *Buletin Palawija*, 19(2): 111–116.
- Soleh, MA, Y Tanaka, SY Kim, SC Huber, K Sakoda, and T Shiraiwa. 2017. Identification of large variation in the photosynthetic induction response among 37 soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] genotypes that is not correlated with steady-state photosynthetic capacity. *Photosynthesis Research*. 131(3): 305–315. DOI: 10.1007/s11120-016-0323-1.
- Soleh, MA, Y Tanaka, Y Nomoto, Y Iwahashi, K Nakashima K, Y Fukuda, SP Long, S, T

- Shiraiwa. 2016. Factors underlying genotypic differences in the induction of photosynthesis in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. *Plant Cell and Environment*. 39(3): 685–693. DOI: 10.1111/pce.12674.
- Song, X, H Guo H, Y Liu, F Wan, J Zhang, and X Chang. 2020. Effects of salicylic acid and sucrose on pigment content in *Pistacia chinensis* leaves. *Scientia Horticulturae*. 259: 108783. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.108783.
- Thanayutsiri, T, P Patrojanasophon, P Opanasopit, T Ngawhirunpat, W Laiwattanapaisal, and T Rojanarata. 2023. Rapid and efficient microwave-assisted extraction of *Caesalpinia sappan* Linn. heartwood and subsequent synthesis of gold nanoparticles. *Green Processing and Synthesis*. 12: 20228109. DOI: 10.1515/gps-2022-8109.
- Uddin, GM, CY Kim, D Chung, KA Kim, and SH Jung. 2015. One-step isolation of sappanol and brazilin from *Caesalpinia sappan* and their effects on oxidative stress-induced retinal death. *BMB Reports*. 48(5): 289–294. DOI: 10.5483/BMBRep.2015.48.5.189.
- Vicente, MRS, and J Plasencia. 2011. Salicylic acid beyond defence: Its role in plant growth and development. *Journal of Experimental Botany*. 62(10): 3321–3338. DOI: 10.1093/jxb/err031.
- Vij, T, PP Anil, R Shams, KK Dash, R Kalsi, VK Pandey, E Harsányi, B Kovács, and AM Shaikh. 2023. A comprehensive review on bioactive compounds found in *Caesalpinia sappan*. *Molecules*. 28(17): 6247. DOI: 10.3390/molecules28176247.
- Wahyudi, I, DKD Sinaga, and LB Jasni. 2014. Pengaruh jarak tanam terhadap pertumbuhan pohon dan beberapa sifat fisis-mekanis kayu jati cepat tumbuh. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*. 19(3): 2040–210.
- Wang, C, J Zhang, J Xie, J Yu, J Li, J Lv, Y Gao, T Niu, and BE Patience. 2022. Effects of preharvest methyl jasmonate and salicylic acid treatments on growth, quality, volatile components, and antioxidant systems of chinese chives. *Frontiers in Plant Science*. 12: 767335. DOI: 10.3389/fpls.2021.767335.
- Wang, Y, S Mostafa S, W Zeng, and B Jin. 2021. Function and mechanism of jasmonic acid in plant responses to abiotic and biotic stresses. *International Journal of Molecular Sciences*. 22(16): 8568. DOI: 10.3390/ijms22168568.
- Wu, W, L Chen, R Liang, S Huang, X Li, B Huang, H Luo, M Zhang, X Wang, and H Zhu. 2024. The role of light in regulating plant growth, development and sugar metabolism: A review. *Frontiers in Plant Science*. 15: 1507628. DOI: 10.3389/fpls.2024.1507628.
- Yang, J, C Li, D Kong, F Guo, and H Wei. 2020. Light-mediated signaling and metabolic changes coordinate stomatal opening and closure. *Frontiers in Plant Science*. 11: 601478. DOI: 10.3389/fpls.2020.601478.
- Yang, W, Z Zhou, and Z Chu. 2023. Emerging roles of salicylic acid in plant saline stress tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*. 24(4): 3388. DOI: 10.3390/ijms24043388.
- Yustiningsih, M. 2019. Intensitas cahaya dan efisiensi fotosintesis pada tanaman naungan dan tanaman terpapar cahaya langsung. *Bio-Edu: Jurnal Pendidikan Biologi*. 4(2): 44–49. DOI: 10.32938/jbe.v4i2.385.
- Zahabu, E, T Raphael, SAO Chamshama, S Iddi, and RE Malimbwi. 2015. Effect of spacing regimes on growth, yield, and wood properties of *Tectona grandis* at Longuza forest plantation, Tanzania. *International Journal of Forestry Research*. 2015(3): 6. DOI: 10.1155/2015/469760.