

**Keterkaitan Perubahan Iklim dan Polinator terhadap Keberhasilan Penyerbukan dan Produksi Semangka (*Citrullus lanatus*): Review**

***The Interrelationship between Climate Change and Pollinators in Determining Pollination Success in Watermelon (*Citrullus lanatus*): A Review***

**Sujinah<sup>1,2</sup>, Wahyu Muhammad Yuha Lubis<sup>1\*</sup>, Nani Yulianti<sup>1,3</sup>, Reni Elmiati<sup>1,4</sup>, Bobot Sudoyo<sup>1</sup>, dan Edi Santosa<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Agronomi dan Hortikultura, Departemen Agronomi dan Hortikultura, Institut Pertanian Bogor (IPB University), Jl. Meranti, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Riset Tanaman Pangan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, BRIN KST Dr. (H.C.) Ir. Soekarno, Jl. Raya Jakarta-Bogor KM 46, Cibinong, Kabupaten Bogor 16915, Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Djuanda  
Jl. Tol Ciawi No. 1, Ciawi, Kabupaten Bogor, 16720, Indonesia

<sup>4</sup>Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Sains, Sosial, dan Pendidikan, Universitas Prima Nusantara  
Bukittinggi

<sup>5</sup>Divisi Ekofisiologi Departemen Agronomi dan Hortikultura, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor (IPB University), Jl. Meranti, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

\*Penulis Korespondensi: [wahyumuhammadyuha@apps.ipb.ac.id](mailto:wahyumuhammadyuha@apps.ipb.ac.id)

Disetujui: 14 Desember 2025 / *Published Online* Mei 2026

**ABSTRAK**

Perubahan iklim merupakan isu besar yang mendapat perhatian luas di bidang pertanian karena berpengaruh langsung terhadap keberlanjutan produksi dan keseimbangan ekosistem. Peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, serta kejadian cuaca ekstrem seperti kekeringan atau gelombang panas dapat mengakibatkan degradasi habitat dan penurunan populasi serangga penyerbuk. Serangga penyerbuk memiliki peran vital dalam menjaga keanekaragaman tanaman dan memastikan proses reproduksi berjalan optimal. Tanaman semangka termasuk komoditas hortikultura yang sangat bergantung pada aktivitas polinator, terutama lebah madu (*Apis mellifera*) yang dikenal paling efektif dalam memindahkan serbuk sari ke kepala putik. Selain itu, berbagai spesies polinator lain seperti *Agapostemon splendens*, *Tetragonula* sp., *Homalictus* sp., *Trigona* spp., dan *Lasioglossum* spp. turut berkontribusi terhadap keberhasilan penyerbukan. Namun, perubahan iklim berpotensi mengganggu aktivitas harian serangga penyerbuk, memengaruhi ketersediaan sumber pakan, serta mengubah fenologi tanaman semangka. Ketidaksesuaian waktu antara fase berbunga dan aktivitas polinator (*phenological mismatch*) dapat menurunkan efektivitas deposisi serbuk sari, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan kualitas dan kuantitas buah. Selain itu, stres abiotik pada tanaman akibat iklim ekstrem juga dapat mengubah karakter bunga, produksi nektar, dan viabilitas serbuk sari, sehingga semakin memperburuk interaksi tanaman polinator. Artikel review ini mensintesis berbagai hasil penelitian terkini yang dipublikasikan pada periode 2016-2025 mengenai dampak perubahan iklim terhadap komunitas polinator, pertumbuhan semangka, serta interaksi tanaman dengan polinator yang menentukan keberhasilan penyerbukan dan produksi buah. Pemahaman menyeluruh mengenai dinamika ini menjadi dasar penting untuk mengembangkan strategi adaptasi guna menjaga stabilitas produksi semangka pada kondisi iklim yang terus berubah, terutama melalui pengelolaan polinator yang berkelanjutan dan penerapan praktik budidaya semangka yang adaptif terhadap perubahan iklim di wilayah tropis.

Kata kunci: ekosistem, kualitas buah, putik, serangga penyerbuk, serbuk sari

**ABSTRACT**

*Climate change is a major global issue that has received extensive attention in the agricultural sector due to its direct impact on production sustainability and ecosystem balance. Rising temperatures altered rainfall patterns, and extreme weather events such as droughts and heatwaves can lead to habitat degradation and significant declines in pollinator populations. Pollinating insects play a vital role in maintaining plant diversity and ensuring optimal reproductive processes. Watermelon is a horticultural crop that relies heavily on pollinator activity, particularly the honeybee (*Apis mellifera*), which is recognized as the most effective species for transferring pollen to the stigma. In addition, various other pollinator species, including *Agapostemon splendens*,*

*Tetragonula sp.*, *Homalictus sp.*, *Trigona spp.*, and *Lasioglossum spp.*, also contribute to pollination success. However, climate change has the potential to disrupt the daily activity patterns of pollinators, affect the availability of floral resources, and alter the phenology of watermelon plants. Temporal mismatches between flowering phases and pollinator activity can reduce pollen deposition efficiency, ultimately decreasing fruit quality and yield. Moreover, plant exposure to abiotic stress induced by extreme climatic conditions may modify floral traits, nectar production, and pollen viability, further impairing plant-pollinator interactions. This review synthesizes recent findings published between 2016 and 2025 regarding the impacts of climate change on pollinator communities, watermelon growth, and plant-pollinator interactions that determine pollination success and fruit production. A comprehensive understanding of these dynamics is essential for developing adaptive strategies to maintain stable watermelon production under increasingly unpredictable climate conditions, particularly through sustainable pollinator management and climate-resilient watermelon cultivation practices in tropical regions.

*Keywords: climate change, fruit set, stigma, pollination service, pollen*

## PENDAHULUAN

Tanaman semangka (*Citrullus lanatus*) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang sangat bergantung pada penyerbukan serangga untuk pembentukan buahnya. Tanaman semangka yang memiliki bunga jantan dan betina terpisah (mono-monoecious), perpindahan serbuk sari melalui bantuan polinator menjadi sangat penting untuk menghasilkan buah berkualitas. Menurut Delgado-Carillo *et al.* (2024), semangka di kawasan pesisir Meksiko, secara nyata bergantung pada kunjungan lebah untuk pembentukan buah. Pada saat kunjungan polinator tidak ada, buah semangka tidak ada sama sekali. Hal ini membuktikan bahwa keberadaan dan aktivitas polinator menjadi aspek penting dalam budidaya semangka.

Selain faktor biotik seperti ketersediaan tanaman pakan dan sarang bagi polinator, faktor abiotik khususnya variabel iklim seperti suhu, kelembapan, curah hujan dan kecepatan angin merupakan elemen yang dapat mempengaruhi populasi polinator dan kelangsungan hidupnya. Penelitian yang dilakukan oleh Millard *et al.* (2023) menunjukkan bahwa interaksi antara perubahan iklim dan penggunaan lahan berhubungan dengan penurunan kelimpahan dan keragaman serangga penyerbuk, sehingga menimbulkan risiko terhadap produksi tanaman yang bergantung pada polinator.

Perubahan iklim berdampak langsung pada fisiologi dan aktivitas harian polinator. Menurut Nielsen *et al.* (2017), kunjungan lebah madu di kebun tundra menunjukkan hubungan unimodal terhadap suhu, yaitu meningkat seiring kenaikan suhu hingga mencapai puncak pada sekitar 24 °C, kemudian menurun pada suhu yang lebih tinggi. Perubahan iklim mengubah fenologi berbunga semangka seperti percepatan waktu berbunga atau pengurangan lama fase berbunga sehingga dapat

menciptakan ketidaksesuaian waktu (*phenological mismatch*) antara tanaman dan polinator. Variabilitas curah hujan dan suhu antar tahun dapat mengubah struktur jaringan tumbuhan dan polinator (*plant-pollinator network*) sehingga potensi penyerbukan menurun. Perubahan suhu ekstrem atau fluktuasi iklim dapat mengganggu aktivitas normal polinator, dan ketidakselarasan antara aktivitas polinator dan kondisi iklim dapat mengurangi penyerbukan.

Keberadaan dan kelangsungan hidup polinator dipengaruhi oleh kondisi iklim yang membentuk distribusi geografis dan kualitas habitatnya. Rahimi dan Jung (2024a) menunjukkan bahwa banyak tanaman budidaya bergantung pada jasa polinasi. Delgado-Carrillo *et al.* (2024) melaporkan bahwa komposisi komunitas polinator, kondisi lanskap, dan mikroklimat memengaruhi tingkat kunjungan polinator. Peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, dan kejadian cuaca ekstrem akibat perubahan iklim berpotensi mengancam kelangsungan populasi lebah dan penyerbuk liar melalui stres fisiologis maupun berkurangnya sumber pakan (Millard *et al.* 2023).

Pada praktik pertanian dan ketahanan pangan, implikasi dari hubungan iklim-polinator tanaman semangka sangat signifikan. Apabila iklim buruk akan mengurangi populasi atau aktivitas polinator, sehingga produktivitas semangka akan menurun, yang akan berdampak pada pendapatan petani kecil, ketersediaan buah di pasar lokal, dan stabilitas pasokan pangan. Millard *et al.* (2023) menegaskan bahwa tanaman tropis bernilai tinggi yang bergantung pada penyerbuk berada pada risiko tinggi jika kombinasi iklim dan perubahan lahan yang tidak ditangani.

Perubahan iklim berpotensi memengaruhi pertumbuhan tanaman semangka, keberadaan dan aktivitas polinator, serta interaksi keduanya yang menentukan keberhasilan penyerbukan dan produksi buah. Tinjauan ini bertujuan untuk: (1)

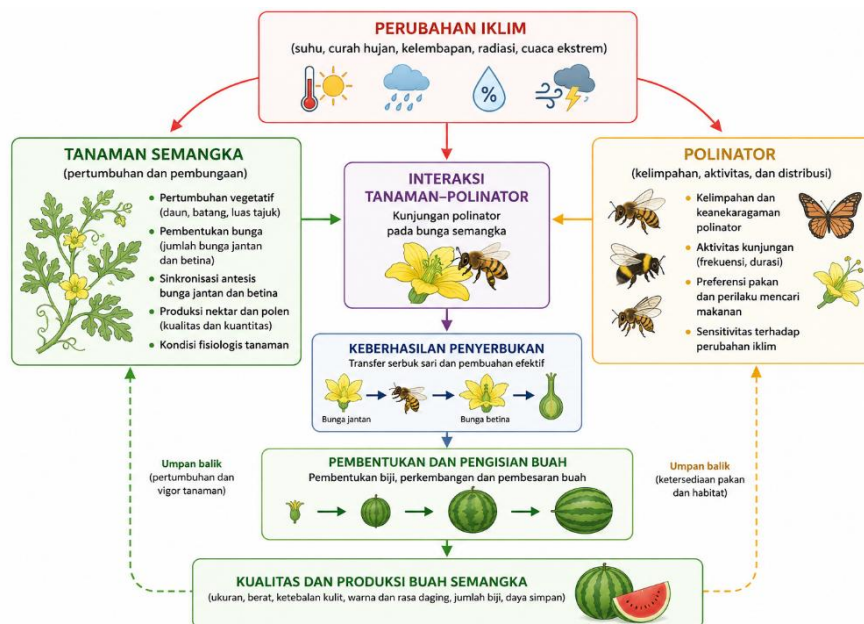
merangkum respons pertumbuhan dan pembungaan semangka terhadap perubahan iklim, (2) mengevaluasi peran polinator terhadap keberhasilan penyerbukan serta kualitas dan kuantitas buah semangka, dan (3) mengkaji bagaimana perubahan iklim memodifikasi interaksi tanaman dengan polinator yang berpengaruh terhadap produktivitas semangka. Hasil kajian ini diharapkan menjadi dasar bagi pengelolaan polinator dan pengembangan strategi adaptasi budidaya semangka yang lebih tangguh terhadap perubahan iklim, khususnya di wilayah tropis.

### KARAKTERISTIK TANAMAN SEMANGKA YANG BERKAITAN DENGAN PENYERBUKAN DAN PRODUKSI BUAH

Tanaman semangka memiliki bunga jantan dan bunga betina yang terpisah pada tanaman yang sama (*monoecious*). Bunga jantan menghasilkan serbuk sari sebagai sumber polen, sedangkan bunga betina memiliki bakal buah yang akan berkembang menjadi buah setelah terjadi pembuahan. Keberhasilan proses reproduksi semangka sangat ditentukan oleh perpindahan serbuk sari dari bunga jantan ke bunga betina yang sebagian besar difasilitasi oleh serangga penyerbuk. Karakteristik pembungaan tersebut menjadikan semangka sebagai tanaman yang sangat bergantung pada layanan polinasi untuk menghasilkan buah dengan jumlah biji, ukuran, dan kualitas yang optimal (Arachchige *et al.*, 2023; Fekadie *et al.*, 2023).

Mashilo *et al.* (2022) menjelaskan bahwa semangka (*Citrullus lanatus* cv. Lanatus) merupakan tanaman semusim berhabitus merambat dengan sulur menjalar panjang, batang beralur dan berambut halus, dengan panjang sulur utama dapat mencapai 3-4 m pada kondisi budidaya intensif. Bentuk daun semangka sebagai salah satu sifat kualitatif utama, dengan variasi tingkat lekukan dan lobus yang dikendalikan oleh gen seperti CILL1 untuk fenotip daun berlobus. Gambar 1 memperlihatkan tipe lekuk daun pada beberapa galur semangka. Sementara itu, menurut Elbekkay *et al.* (2021), variasi ukuran dan bentuk daun berkorelasi dengan kemampuan tanaman menutup permukaan tanah, yang berimplikasi pada efisiensi pemanfaatan cahaya dan kemampuan menekan gulma pada lingkungan kering. Hal yang sama disampaikan oleh Wahyudi *et al.* (2024), luas daun yang besar akan mempengaruhi proses fotosintesis dalam menghasilkan karbohidrat, yang ditranslokasikan ke bagian buah, sehingga mempengaruhi ukuran dan berat buah.

Karakter morfologi dan fisiologi tanaman semangka berperan penting dalam mendukung interaksi tanaman-polinator. Karakter bunga dan ketersediaan sumber pakan, seperti nektar dan polen, memengaruhi daya tarik tanaman bagi serangga penyerbuk serta menentukan intensitas kunjungan polinator. Interaksi tersebut berpengaruh terhadap keberhasilan transfer polen yang selanjutnya menentukan pembentukan biji, perkembangan buah, dan produktivitas tanaman semangka.



Gambar 1. Skema konseptual hubungan antara perubahan iklim, tanaman semangka, polinator, dan keberhasilan penyerbukan yang menentukan kualitas serta produksi buah semangka (disusun oleh penulis)

Hubungan antara karakter tanaman dan aktivitas polinator menunjukkan bahwa keberhasilan produksi semangka tidak hanya ditentukan oleh faktor genetik tanaman, tetapi juga oleh efektivitas proses penyerbukan yang berlangsung di lapangan (Prasifka *et al.*, 2018; Arachchige *et al.*, 2023).

Sifat kualitatif buah semangka mencakup bentuk (bulat, oval, lonjong), warna kulit (hijau tua, hijau muda, belang, bercak), pola kulit (garis, marmer, polos), dan warna daging (merah, merah muda, kuning, jingga, hingga putih), sedangkan sifat kuantitatifnya mencakup berat buah, panjang, diameter, dan ketebalan kulit (Mashilo *et al.*, 2022). Semangka yang memiliki warna kulit hijau gelap polos umumnya berkulit lebih tebal, tahan pecah, dan memiliki daya simpan yang lebih lama. Karakter fisik buah seperti ukuran, berat, ketebalan kulit, dan ukuran biji dipengaruhi oleh faktor genetik serta kondisi lingkungan selama pertumbuhan tanaman (Liang *et al.*, 2022). Kualitas buah semangka ditentukan oleh total padatan terlarut (Brix), tekstur daging, warna daging, dan ketahanan simpan yang merupakan hasil interaksi antara genotipe dan lingkungan. Karakter seperti *hollow heart* (rongga pada bagian tengah daging buah akibat perkembangan jaringan yang tidak sempurna), kecenderungan pecah, dan penurunan kekerasan daging selama penyimpanan menjadi aspek penting yang memengaruhi penerimaan konsumen dan kerusakan pascapanen (Mashilo *et al.*, 2022).

Zamuz *et al.* (2021) menyatakan bahwa daging semangka kaya air (sekitar 91%-92%), gula sederhana (fruktosa, glukosa, dan sukrosa), serta merupakan salah satu sumber utama likopen di antara buah segar. Semangka juga mengandung L-sitrunin, fenolik, dan flavonoid yang berperan sebagai senyawa bioaktif dengan aktivitas antioksidan. Biji dan kulit semangka turut berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan pangan fungsional karena mengandung berbagai senyawa bioaktif tersebut. Mutu buah semangka merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor genetik, proses fisiologis tanaman, dan kondisi lingkungan yang memengaruhi akumulasi gula, pigmen, serta senyawa bioaktif lainnya (Kenea *et al.*, 2025).

Karakter morfologi, fisiologi, dan mutu buah semangka dipengaruhi oleh interaksi antara faktor genetik dan lingkungan. Perubahan kondisi iklim berpotensi memengaruhi pertumbuhan tanaman, pembungaan, serta perkembangan buah, sehingga dapat berdampak pada keberhasilan penyerbukan dan produktivitas semangka. Oleh karena itu, pemahaman mengenai respons tanaman semangka terhadap perubahan iklim menjadi penting untuk mendukung stabilitas produksi pada berbagai kondisi lingkungan.

## PENGARUH PERUBAHAN IKLIM TERHADAP PERTUMBUHAN SEMANGKA

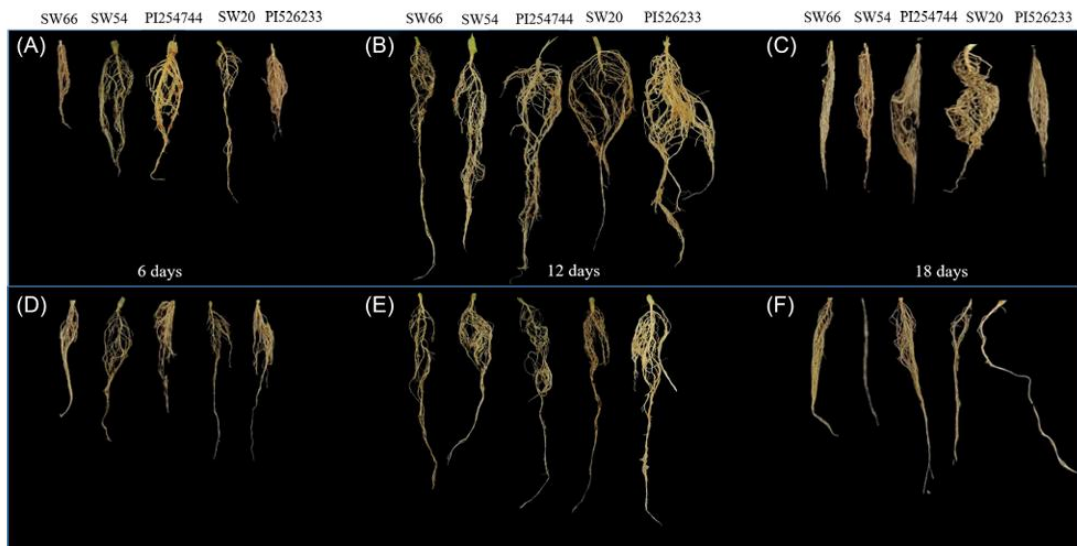
Tanaman semangka sensitif terhadap kondisi lingkungan selama fase vegetatif, pembungaan, dan pembesaran buah. Perubahan pola iklim seperti peningkatan suhu rata-rata, variabilitas curah hujan, frekuensi gelombang panas dan kekeringan berpotensi mengubah produktivitas dan kesesuaian kawasan budidaya. Oleh karena itu, memahami mekanisme respons tanaman terhadap faktor iklim dan opsi mitigasi/adaptasi adalah krusial bagi ketahanan produksi (Hamad *et al.*, 2023).

Penelitian dampak iklim terhadap pertumbuhan semangka telah banyak dilakukan. Penelitian Jang *et al.* (2022) menunjukkan bahwa suhu optimal dan ambang toleransi semangka pada pertumbuhan vegetatif dan pembungaan pada kisaran sekitar 20-30 °C, sedangkan pertumbuhan terhambat pada suhu rendah  $\leq 10$  °C dan pada suhu 1 °C tanaman tidak dapat tumbuh. Namun demikian, pada tanaman yang telah dewasa masih dapat hidup pada suhu tinggi di atas 45 °C. Lebih lanjut, cekaman suhu rendah mempengaruhi perkembangan pertumbuhan akar (Gambar 2).

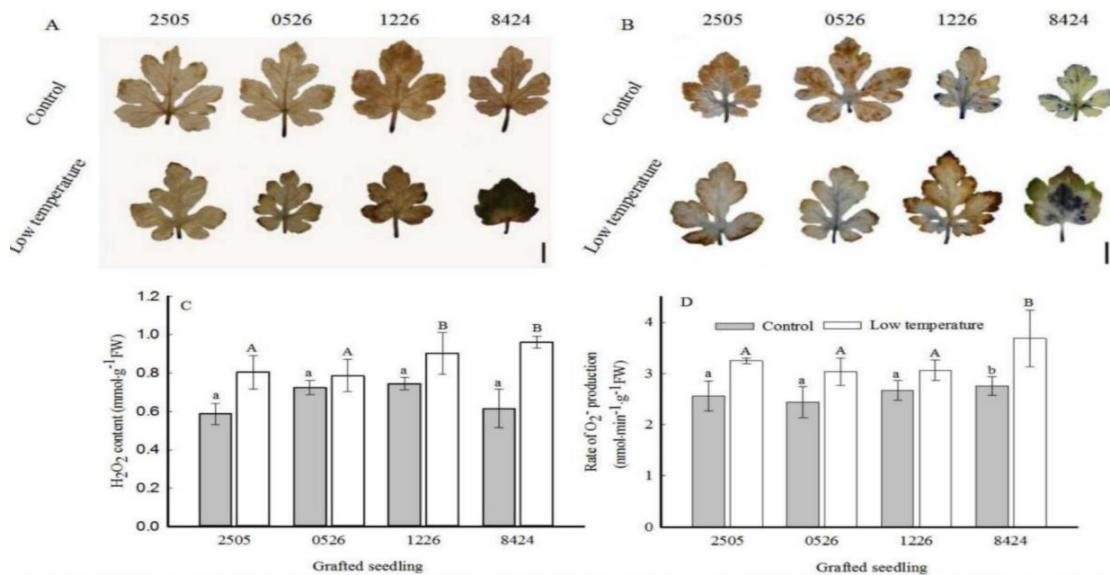
Cekaman suhu rendah ( $< 10$  °C) menyebabkan penurunan pertumbuhan sistem perakaran yang ditunjukkan oleh berkurangnya panjang, jumlah, dan percabangan akar, dengan dampak yang lebih besar pada genotipe rentan dibandingkan genotipe toleran (Yaseen *et al.*, 2025).

Cekaman suhu rendah meningkatkan akumulasi ROS seperti  $H_2O_2$  dan  $O_2^-$  yang memicu stres oksidatif, peroksidasi lipid, dan kerusakan membran sel (Gambar 3.) Tingkat kerusakan yang terjadi berbeda antar genotipe, menunjukkan adanya variasi toleransi terhadap cekaman suhu rendah (Lu *et al.*, 2021).

Dampak lain dari perubahan iklim adalah terjadinya kekeringan. Cekaman kekeringan menghambat pertumbuhan tanaman, dan tanaman akan merespon melalui serangkaian respon adaptif morfologi, fisiologi, dan biokimia. Akar berperan penting dalam mendeteksi cekaman kekeringan dan menentukan respons adaptif tanaman terhadap kondisi tersebut. Cekaman kekeringan yang dimulai pada saat bibit (memiliki 4 daun), secara signifikan menghambat pertumbuhan akar semangka, yang terlihat dengan penurunan panjang, volume, luas, ujung, dan percabangan akar (Ren *et al.*, 2025). Lebih lanjut, kekeringan menyebabkan penurunan fotosintesis, yang disebabkan oleh penutupan stomata.



Gambar 2. Perubahan morfologi akar semangka. A, B, C pada kondisi suhu normal, sedangkan D, E, F pada kondisi cekaman suhu selama 6, 12, 18 hari. Genotipe resisten (P1254744, SW66, SW20) dan rentan (P156233, SW54) (Yaseen *et al.*, 2025)



Gambar 3. Pengaruh suhu rendah terhadap kandungan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> pada daun bibit semangka. Genotipe 2505, 0526, 1226 merupakan tanaman sambung dan 8424 non-sambung (Lu *et al.*, 2021)

Semangka tipe liar yang toleran terhadap kekeringan merespon kekeringan lebih cepat dibanding kultivar lain dengan membatasi penutupan stomata lebih cepat. Selain itu, genotipe toleran memiliki kandungan klorofil yang lebih tinggi, karena genotipe ini memiliki kemampuan untuk melindungi molekul klorofil yang teroksidasi (Malambane *et al.*, 2021). Perubahan fisiologis yang terjadi akibat cekaman suhu rendah maupun kekeringan tidak hanya memengaruhi pertumbuhan tanaman semangka, tetapi juga berpotensi memengaruhi proses reproduksi dan keberhasilan penyerbukan. Penurunan fotosintesis dan pertumbuhan tanaman dapat mengurangi

pembentukan bunga dan ketersediaan sumber daya reproduktif. Cekaman lingkungan diketahui dapat mengubah karakter bunga, produksi nektar, dan ketersediaan polen yang berperan penting dalam interaksi tanaman-polinator (Descamps *et al.*, 2021). Dengan demikian, dampak perubahan iklim terhadap produksi semangka dapat terjadi secara tidak langsung melalui perubahan karakter reproduktif tanaman dan interaksi tanaman-polinator, selain melalui pengaruh langsung terhadap pertumbuhan tanaman (Samanta *et al.*, 2025).

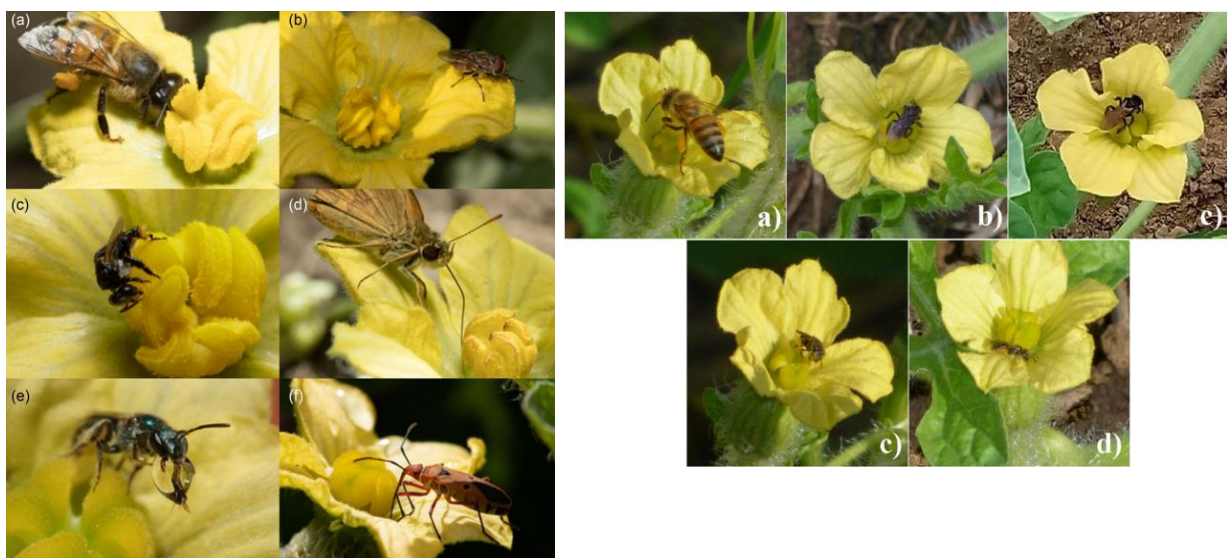
## PERAN POLINATOR TERHADAP PENYERBUKAN SEMANGKA

Serangga penyerbuk, termasuk lebah, lalat, kumbang, dan ngengat merupakan komponen kunci yang berperan penting dalam reproduksi tanaman dan fungsi ekosistem. Keanekaragaman serangga penyerbuk sangat penting menjaga ketahanan ekosistem dan meningkatkan keanekaragaman genetik pada tanaman. Setiap jenis penyerbuk memiliki keunikan tersendiri dalam memindahkan serbuk sari, misalnya lebah menggunakan bulu halus untuk mengumpulkan serbuk sari, sedangkan kupu-kupu menggunakan lidahnya yang panjang untuk menjangkau bagian bunga yang dalam. Tanpa bantuan serangga penyerbuk, tanaman akan sulit bereproduksi, sehingga variasi tanaman relatif rendah (Maggi *et al.*, 2023).

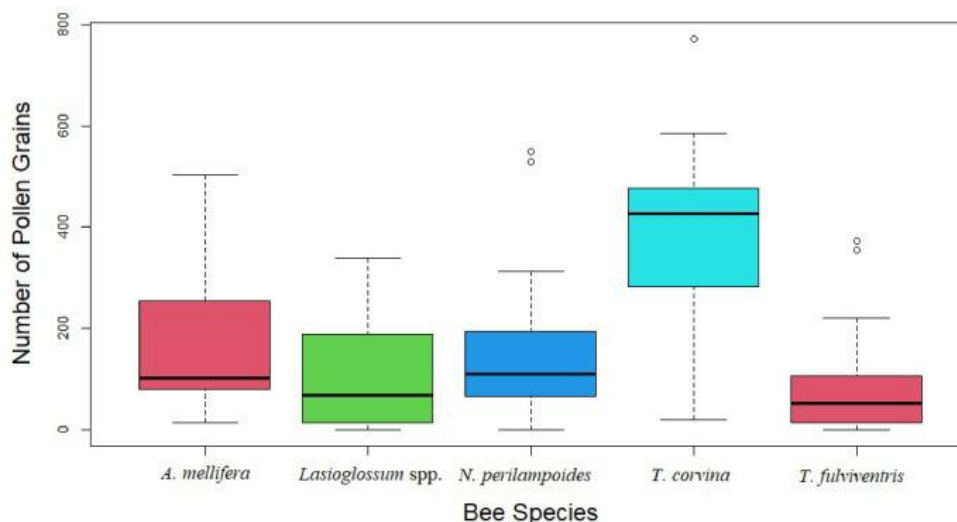
Berdasarkan hasil penelitian Campbell *et al.* (2019), terdapat 478 serangga yang mengunjungi bunga semangka selama 2013-2015 di lahan semangka komersial wilayah Florida, yang terdiri dari 43 spesies dan didominasi oleh lebah (32 spesies). Lebih lanjut, *Apis mellifera* merupakan spesies yang umum mengunjungi bunga semangka. Hasil yang sama juga dikemukakan oleh Arachchige *et al.* (2022) bahwa 73%-94% lebah madu yang mengunjungi bunga semangka di 15 lahan semangka yang ada di Australia. Tingginya lebah madu yang datang disebabkan karena sebagian besar petani melakukan budidaya lebah madu secara komersial di wilayah penghasil semangka. Lebah madu merupakan penyerbuk

semangka yang efektif, dengan berpindah secara berkala diantara bunga dan rata-rata 40 butir serbuk sari per kunjungan. Selain lebah madu, semangka juga dikunjungi oleh serangga lain, lebah, kupu-kupu, dan kumbang. Gambar 4 memperlihatkan kunjungan spesies serangga pada bunga semangka di Australia dan Panama. Polinator yang ditemukan di Australia didominasi oleh *Apis mellifera* dan *Tetragonula* sp. (Arachchige *et al.*, 2022), sedangkan di Panama ditemukan *Trigona corvina*, *Trigona fulviventris*, *Nannotrigona perilampoides*, dan *Lasioglossum* spp. (Di Trani *et al.*, 2024).

Hasil yang berbeda dikemukakan oleh Di Trani *et al.* (2024), secara umum *T. corvina* memiliki kinerja yang lebih baik dibanding jenis lebah lainnya. Hal ini diindikasikan dengan banyaknya serbuk sari yang dibawa untuk menyerbuki bunga semangka di Panama (Gambar 5). Lebih lanjut, ukuran tubuh lebah penyerbuk sepertinya tidak menentukan jumlah serbuk sari yang diendapkan ke kepala putik. *A. mellifera* yang memiliki ukuran besar tidak menyimpan serbuk sari dalam jumlah banyak, dan *N. perilampoides* dan *Lasioglossum* spp. yang berukuran kecil mengangkut serbuk sari sedikit. Sementara itu, *T. corvina* dan *T. fulviventris* yang memiliki ukuran tubuh yang sama, namun keduanya mengangkut serbuk sari paling banyak dan paling sedikit. Hasil penelitian lain menunjukkan tren yang sama, di mana Campbell *et al.* (2018), tidak menemukan perbedaan yang nyata terhadap serbuk sari yang diendapkan oleh *Bombus impatiens*, *A. mellifera*, dan *Agapostemon splendens*.



Gambar 4. Serangga yang mengunjungi semangka, *Apis mellifera* (a), Dipteran sp. (b), *Tetragonula* sp. (c), Lepidopteran sp. (d), *Homalictus* sp. (e), dan *Hemipetran* sp. (f) (bagian kiri) dan *Apis mellifera* (a), *Trigona corvina* (b), *Trigona fulviventris* (c), *Nannotrigona perilampoides* (d), dan *Lasioglossum* spp. (e) (bagian kanan) (Arachchige *et al.*, 2022; Di Trani *et al.*, 2024)



Gambar 5. Jumlah serbuk sari yang diendapkan pada kepala putik bunga semangka oleh beberapa spesies lebah (Di Trani *et al.*, 2024)

Sementara itu, hasil penelitian Di Trani *et al.* (2023), setiap spesies lebah menunjukkan perilaku harian tertentu dalam mengunjungi bunga, termasuk preferensi jenis kelamin bunga dan durasi kunjungan. Nektar merupakan sumber daya utama yang diburu oleh sebagian besar lebah, dengan tingkat kunjungan yang sebanding untuk bunga jantan (*staminate*) dan betina (*pistillate*). Lebah madu mengalokasikan hampir separuh kunjungan mereka (47.7%) untuk pengumpulan serbuk sari, dan mayoritas kunjungan harian mereka terjadi antara pukul 7.00 dan 8.00. Sebaliknya, kunjungan lebah tanpa sengat mencapai puncaknya antara pukul 8.00 dan 9.00. Durasi kunjungan nektar lebih pendek daripada kunjungan serbuk sari, dengan lebah madu menunjukkan durasi terpendek saat mengunjungi bunga semangka. Hal ini mengindikasikan bahwa banyaknya serbuk sari yang diendapkan pada kepala putik lebih dipengaruhi oleh perilaku serangga penyerbuk.

Tabel 1 menunjukkan bahwa kelimpahan polinator tidak selalu berbanding lurus dengan efektivitas penyerbukannya. *Apis mellifera* merupakan polinator yang paling sering ditemukan pada pertanaman semangka dan mendominasi jumlah kunjungan bunga di berbagai wilayah (Arachchige *et al.*, 2022). Namun, efektivitas penyerbukan lebih ditentukan oleh kemampuan deposisi polen dan perilaku kunjungan pada bunga. Di Trani *et al.* (2024) melaporkan bahwa *Trigona corvina* mengendapkan serbuk sari lebih banyak dibandingkan *A. mellifera*, sedangkan Campbell *et al.* (2018) menunjukkan bahwa *Agapostemon splendens* dan *Bombus impatiens* memiliki efektivitas deposisi polen yang sebanding dengan lebah madu. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan penyerbukan semangka dipengaruhi

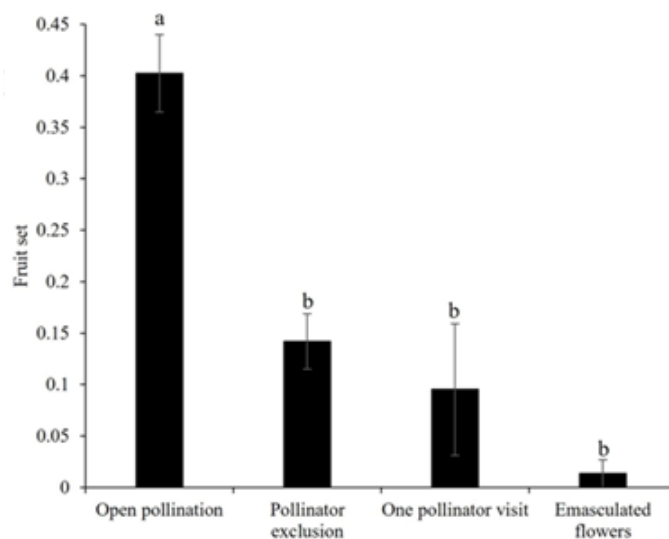
tidak hanya oleh jumlah kunjungan polinator, tetapi juga oleh kualitas layanan penyerbukan yang diberikan oleh masing-masing spesies. Oleh karena itu, pengelolaan polinator pada budidaya semangka perlu mempertimbangkan keberadaan dan konservasi berbagai spesies polinator, bukan hanya peningkatan populasi lebah madu.

#### PERAN POLINATOR TERHADAP KUALITAS DAN KUANTITAS BUAH SEMANGKA

Tanaman semangka merupakan tanaman berumah satu dengan bunga jantan dan betina terpisah, sehingga proses penyerbukan silang oleh polinator serangga merupakan syarat utama keberhasilan reproduksinya. Tidak seperti beberapa *cucurbitacea* lain yang mampu melakukan sebagian penyerbukan sendiri, semangka memiliki ketergantungan terhadap polinator biotik. Bukti terkuat diperoleh dari penelitian eksklusi polinator oleh Delgado-Carrillo *et al.* (2024), yang menutup bunga semangka untuk mencegah kunjungan serangga dan mendapati bahwa *fruit-set* turun menjadi 0%, tanpa satu pun buah yang terbentuk (Gambar 6). Temuan ini mengonfirmasi bahwa mekanisme autogami maupun anemogami tidak mampu menggantikan peran serangga penyerbuk dalam transfer serbuk sari dari bunga jantan ke stigma bunga betina. Selain itu, Sawe *et al.* (2020) menunjukkan bahwa ketidakcukupan kunjungan polinator menjadi penyebab utama rendahnya hasil semangka di Tanzania, mempertegas bahwa defisit polinasi merupakan faktor pembatas paling kritis dalam produksi semangka.

Tabel 1. Karakteristik beberapa polinator utama pada tanaman semangka

Spesies polinator	Kelimpahan atau kunjungan	Waktu kunjungan dominan	Efektivitas deposisi polen	Referensi
<i>Apis mellifera</i>	Dominan pada banyak pertanaman semangka (73%-94% kunjungan di Australia)	07.00-08.00	±40 butir polen per kunjungan, efektif sebagai penyerbuk utama	Arachchige <i>et al.</i> (2022); Di Trani <i>et al.</i> (2023)
<i>Tetragonula</i> sp.	Relatif melimpah pada beberapa lokasi	08.00-09.00	Efektivitas setara lebah madu pada beberapa kondisi	Arachchige <i>et al.</i> (2022)
<i>Trigona corvina</i>	Kelimpahan lebih rendah dibanding lebah madu	Pagi hari	Deposisi polen tertinggi di antara spesies yang diamati	Di Trani <i>et al.</i> (2024)
<i>Trigona fulviventris</i>	Rendah-sedang	Pagi hari	Deposisi polen relatif rendah	Di Trani <i>et al.</i> (2024)
<i>Lasioglossum</i> spp.	Umum ditemukan pada bunga semangka	Pagi hari	Deposisi polen rendah-sedang	Di Trani <i>et al.</i> (2024)
<i>Agapostemon splendens</i>	Lebah liar umum pada pertanaman semangka	Tidak dilaporkan	Tidak berbeda nyata dengan <i>A. mellifera</i> dalam deposisi polen	Campbell <i>et al.</i> (2018)

Gambar 6. Pengaruh polinator terhadap keberhasilan pembuahan (*fruit set*) pada semangka (Delgado-Carrillo *et al.*, 2024)

Fekadie *et al.* (2023) menunjukkan bahwa keberadaan koloni lebah madu meningkatkan *fruit-set*, jumlah buah per tanaman, dan total hasil panen secara signifikan. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa tanaman semangka yang diserbuki lebah madu dapat menghasilkan kualitas buah yang baik dan kuantitas buah yang jauh lebih tinggi dibanding tanaman tanpa polinator (Tabel 2). Penelitian ini menegaskan bahwa intensitas kunjungan lebah madu berkorelasi positif dengan keberhasilan deposisi polen pada stigma dan ukuran buah akhir. Di sisi lain, Arachchige *et al.* (2023) menegaskan bahwa lebah madu berfungsi sebagai penyerbuk utama di sebagian besar sistem

budidaya semangka global, meskipun efektivitasnya dapat bervariasi tergantung kondisi lingkungan dan ketersediaan bunga. Secara keseluruhan, lebah madu terbukti mendukung peningkatan signifikan pada produktivitas semangka melalui efisiensi transfer polen dan frekuensi kunjungan bunga.

Selain lebah madu, lebah liar terbukti memberikan kontribusi signifikan terhadap *fruit-set* dan hasil semangka. Leach & Kaplan (2023) menilai efektivitas polinasi pada semangka *seedless* melalui manipulasi intensitas kunjungan lebah madu, lebah liar, dan tekanan hama kumbang.

Tabel 2. Pengaruh metode polinasi terhadap kualitas dan hasil semangka

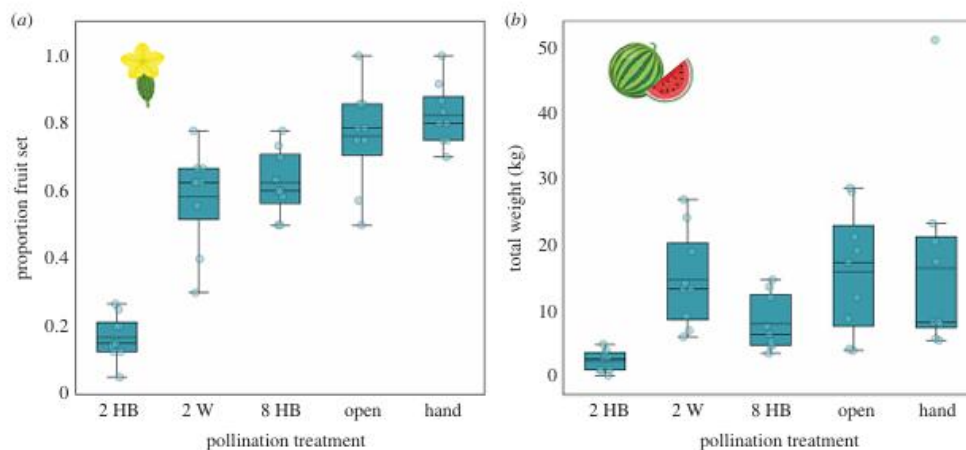
Parameter	Lebah madu	Polinasi terbuka	Polinasi sendiri
Total padatan terlarut (%)	9.31 a	8.23 b	6.90 c
Jumlah biji per buah	520.11 a	424.48 b	385.22 c
Hasil buah (t/ha)	58.42 a	44.35 b	21.14 c
Berat buah (kg)	4.00 a	3.73 a	2.82 b
Jumlah buah per tanaman	1.94 a	1.58 b	1.03 c
Berat 100 biji	5.79 a	5.77 a	4.72 b

Sumber: Fekadie *et al.*, 2023.

Mereka menemukan bahwa perlakuan yang hanya menerima kunjungan lebah liar menghasilkan 1.5 hingga 3 kali lebih banyak buah dibandingkan perlakuan yang hanya mengandalkan lebah madu (Gambar 7). Hasil berbeda ditunjukkan oleh penelitian Garantonakis *et al.* (2016), penyerbukan yang dilakukan oleh lebah madu ataupun lebah liar (*Lasioglossum*) tidak menghasilkan karakteristik kualitas semangka yang signifikan berbeda (Tabel 3). Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan spesies penyerbuk alternatif, selain lebah madu dapat dimanfaatkan sebagai penyerbuk semangka.

Hasil berbagai penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan penyerbukan berkontribusi langsung terhadap peningkatan kualitas dan hasil buah semangka. Dari sudut pandang agroekonomi, peningkatan fruit set, jumlah buah, dan bobot buah

berpotensi meningkatkan pendapatan petani melalui peningkatan produktivitas lahan. Pemanfaatan koloni lebah madu dapat menjadi strategi yang efektif untuk meningkatkan layanan penyerbukan pada pertanaman semangka, terutama pada wilayah dengan kelimpahan polinator alami yang rendah. Namun, hasil beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa lebah liar mampu memberikan efektivitas penyerbukan yang setara bahkan lebih tinggi dibandingkan lebah madu pada kondisi tertentu (Di Trani *et al.* 2024; Leach & Kaplan, 2023). Oleh karena itu, pengelolaan polinator yang berkelanjutan perlu mengombinasikan penggunaan koloni lebah budidaya dengan konservasi habitat polinator liar untuk memperoleh layanan penyerbukan yang optimal dan efisien.



Gambar 7. Pengaruh kunjungan penyerbuk terhadap pembentukan buah (a) dan berat buah semangka (b). HB: lebah madu, W: lebah liar (Leach & Kaplan, 2023)

Tabel 3. Pengaruh polinator terhadap kualitas semangka

Karakteristik	Lebah madu	Lebah liar	Alami	Kontrol
Berat (kg per buah)	3.859 a	4.161 a	3.962 a	4.223 a
Brix	11.651 a	11.663 a	11.520 a	11.671 a
Jumlah biji per buah	222.829 b	274.175 ab	334.558 a	313.346 a
Berat biji per buah (g)	0.079 c	0.080 bc	0.083 b	0.087 a

Alami: penyerbukan terjadi beberapa kali kunjungan, kontrol: penyerbukan dengan bantuan manusia.

Sumber: Garantonakis *et al.*, 2016.

Keberlanjutan produksi semangka di wilayah tropis seperti Indonesia bergantung pada kemampuan sistem budidaya dalam mempertahankan keberadaan polinator. Pemeliharaan vegetasi alami di sekitar pertanaman, pengurangan penggunaan insektisida yang tidak selektif, dan penyediaan sumber pakan bagi polinator dapat menjadi strategi penting untuk menjaga efektivitas penyerbukan di bawah tekanan perubahan iklim.

### PENGARUH PERUBAHAN IKLIM TERHADAP POLINATOR

Salah satu dimensi terpenting dari perubahan iklim adalah peningkatan suhu rata-rata. Lebah sebagai organisme ektoterm sangat bergantung pada suhu lingkungan untuk mengatur aktivitas terbang, pencarian pakan, dan fungsi fisiologis koloninya. Pemanasan global dapat menggeser fenologi kemunculan serangga polinator dan mengubah pola aktivitas harian mereka, sehingga meningkatkan risiko mismatch temporal dengan fase berbunga tanaman (Trunschke *et al.*, 2024). Berdasarkan pemodelan pada skala global, distribusi 1,365 spesies lebah menunjukkan bahwa sekitar 65 % spesies berpotensi mengalami penurunan luas distribusi yang sesuai iklim di bawah pemanasan ekstrim (SSP585) tahun 2070 (Rahimi & Jung, 2024b). Penurunan ini paling besar diproyeksikan terjadi di Afrika dan Eropa, namun banyak area tropis juga menunjukkan tren penurunan kesesuaian iklim. Perubahan distribusi ini berpotensi mengubah komposisi komunitas lebah yang hadir di pertanaman semangka, baik dari sisi kelimpahan maupun efektivitas penyerbukan. Lebih lanjut, hasil penelitian Lee *et al.* (2018), menunjukkan bahwa kondisi iklim berkorelasi nyata dengan aktivitas lebah, termasuk lalu lintas penerbangan dan aktivitas mencari makan. Suhu memiliki pengaruh besar terhadap perilaku lebah madu, di mana jumlah lebah yang terbang tinggi dan tidak menyerbuki bunga berkorelasi positif dengan suhu.

Selain suhu, perubahan pola curah hujan dan kekeringan juga sangat menentukan keberadaan polinator semangka. Kekeringan yang berkepanjangan dapat mengurangi jumlah dan kualitas bunga, menurunkan produksi nektar dan polen, serta memperpendek masa berbunga (Samanta *et al.*, 2025). Apabila fase pembungaan terjadi pada periode kering dengan sumber bunga liar yang terbatas, polinator akan bergantung hampir sepenuhnya pada bunga semangka. Kondisi ini dapat meningkatkan tekanan mencari makan dan stres nutrisi pada koloni, terutama bila luasan monokultur sangat besar dan tidak diimbangi habitat semi-alami di sekitarnya. Menurut

Descamps *et al.* (2021), kekeringan akan mengubah interaksi tanaman-penyerbuk melalui perubahan tampilan bunga, volume nektar, komposisi gula, dan jumlah serbuk sari. Perubahan karakter bunga tersebut dapat memengaruhi frekuensi kunjungan polinator dan efektivitas transfer serbuk sari. Penurunan layanan penyerbukan pada akhirnya berdampak terhadap keberhasilan pembentukan buah, kualitas hasil, dan produktivitas semangka. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa perubahan iklim dapat memengaruhi hasil semangka secara tidak langsung melalui perubahan komunitas polinator dan interaksi tanaman-polinator.

Strategi adaptasi untuk mempertahankan layanan penyerbukan di bawah kondisi iklim yang berubah perlu diarahkan pada pengelolaan habitat dan lanskap yang mendukung keberadaan polinator. Penyediaan habitat semi-alami di sekitar pertanaman, peningkatan keragaman tanaman berbunga sebagai sumber pakan sepanjang musim, serta pengelolaan lanskap yang mempertahankan konektivitas habitat dapat membantu menjaga kelimpahan dan keanekaragaman polinator. Pendekatan tersebut berpotensi meningkatkan stabilitas layanan penyerbukan sekaligus memperkuat ketahanan sistem produksi semangka terhadap dampak perubahan iklim (Millard *et al.*, 2023; Samanta *et al.*, 2025).

### KESIMPULAN

Tanaman semangka sangat bergantung pada serangga penyerbuk, terutama lebah, untuk menjamin keberhasilan transfer serbuk sari, pembentukan buah, dan pencapaian hasil yang optimal. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perubahan iklim memengaruhi pertumbuhan dan fisiologi tanaman semangka, serta kelimpahan, distribusi, dan aktivitas polinator. Peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, dan kejadian cuaca ekstrem dapat mengganggu interaksi tanaman-polinator melalui perubahan karakter bunga, ketersediaan nektar dan polen, serta ketidaksesuaian waktu antara pembungaan dan aktivitas polinator. Gangguan pada interaksi tersebut berpotensi menurunkan keberhasilan penyerbukan, kualitas buah, dan produktivitas semangka.

Implikasi hasil kajian ini menunjukkan bahwa keberlanjutan produksi semangka di wilayah tropis memerlukan pengelolaan polinator yang terintegrasi dengan strategi adaptasi terhadap perubahan iklim. Pemeliharaan habitat semi-alami, peningkatan keragaman tanaman berbunga, dan pengelolaan lanskap yang mendukung keberadaan polinator dapat membantu mempertahankan stabilitas layanan penyerbukan. Penelitian lanjutan

perlu difokuskan pada kondisi agroekosistem tropis, khususnya untuk memahami respons berbagai spesies polinator terhadap perubahan iklim dan mengembangkan pendekatan agroekologi yang mampu meningkatkan ketahanan sistem produksi semangka secara berkelanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Arachchige, E. C. W. S., Evans, L. J., Campbell, J. W., Delaplane, K. S., Rice, E. S., Cutting, B. T., Kendall, L. K., Samnegård, U., & Rader, R. (2023). A global assessment of the species composition and effectiveness of watermelon pollinators and the management strategies to inform effective pollination service delivery. *Basic and Applied Ecology*, 66(3), 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.11.006>.
- Arachchige, E. C. W. S., Rader, R., Cutting, B. T., Keir, M., van Noort, T., Fale, G., Howlett, B. G., Samnegård, U., & Evans, L. J. (2022). Honey bees are the most abundant visitors to Australian watermelon but native stingless bees are equally effective as pollinators. *Ecological Solutions and Evidence*, 3(4), 1–14. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12189>
- Campbell, J. W., Daniels, J. C., & Ellis, J. D. (2018). Fruit set and single visit stigma pollen deposition by managed bumble bees and wild bees in *Citrullus lanatus* (Cucurbitales: Cucurbitaceae). *Journal of Economic Entomology*, 111(2), 989–992. <https://doi.org/10.1093/jee/toy008>
- Campbell, J. W., Stanley-Stahr, C., Bammer, M., Daniels, J. C., & Ellis, J. D. (2019). Contribution of bees and other pollinators to watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.) pollination. *Journal of Apicultural Research*, 58(4), 597–603. <https://doi.org/10.1080/00218839.2019.1614271>
- Delgado-Carrillo, O., Martén-Rodríguez, S., Ramírez-Mejía, D., Novais, S., Quevedo, A., Ghilardi, A., Roberto, S., Lopezaraiza-Mikel, M., Pérez-Trujillo, E., & Quesada, M. (2024). Pollination services to crops of watermelon (*Citrullus lanatus*) and green tomato (*Physalis ixocarpa*) in the coastal region of Jalisco, Mexico. *PLoS ONE*, 19(7), 1–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301402>
- Descamps, C., Quinet, M., & Jacquemart, A. L. (2021). The effects of drought on plant-pollinator interactions: What to expect. *Environmental and Experimental Botany*, 182, 104297. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104297>.
- Di Trani, J. C., Ramírez, V. M., Barba, A., & Añino, Y. (2023). Foraging patterns of bees in watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.) flowers in Panama. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 11(3), 1–11. <https://doi.org/10.31893/jabb.23022>
- Di Trani, J. C., Ramírez, V. M., Barba, A., & Añino, Y. (2024). Bee pollination efficiency in watermelon (*Citrullus lanatus*) crops in Panama. *Scientia Horticulturae*, 323, 112537. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112537>
- Elbekkay, M., Hamza, H., Neily, M. H., Djebali, N., & Ferchichi, A. (2021). Characterization of watermelon local cultivars from Southern Tunisia using morphological traits and molecular markers. *Euphytica*, 217(74), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02809-9>
- Fekadie, B., Getachew, A., Ayalew, W., & Jenberie, A. (2023). Evaluating the effect of honeybee pollination on production of watermelon (*Citrullus lanatus*) in Northern Ethiopia. *International Journal of Tropical Insect Science*, 43(5), 1431–1449. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01042-2>
- Garantonakis, N., Varikou, K., Birouraki, A., Edwards, M., Kalliakaki, V., & Andrinopoulos, F. (2016). Comparing the pollination services of honeybees and wild bees in a watermelon field. *Scientia Horticulturae*, 204, 138–144. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.006>
- Hamad, A. O., Kai, K. H., Kijazi, A., Khamis, S. A., Abdalla, A. H., Ame, H. K., Faki, M. M., & Ali, F. A. (2023). The influence of climate variability on watermelon production in Zanzibar. *Atmospheric and Climate Sciences*, 13(1), 44–61. <https://doi.org/10.4236/acs.2023.131004>
- Jang, Y., Ji-Hye, M., Sang-Gyu, K., Taebok, K., Oak-Jin, L., Hee-Ju, L., & Seung-Hwan, W. (2022). Effect of low-temperature tolerant rootstocks on the growth and fruit quality of watermelon in semi-forcing and retarding culture. *Agronomy*, 13(1), 67. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010067>
- Kenea, F. T., He, N., Lu, X., Luo, X., Zhu, H., & Liu, W. (2025). Watermelon fruit metabolome gene discovery and its application in breeding: A review. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1687406. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1687406>
- Leach, H., & Kaplan, I. (2023). Prioritizing pollinators over pests: Wild bees are more important than beetle damage for seedless

- watermelon yield. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290, 20221279.  
<https://doi.org/10.1098/rspb.2022.1279>
- Lee, K. Y., Lim, J., Yoon, H. J., & Ko, H. J. (2018). Effect of climatic conditions on pollination behavior of honeybees (*Apis mellifera* L.) in the greenhouse cultivation of watermelon (*Citrullus lanatus* L.). *Journal of Apiculture*, 33(4), 239–250.  
<https://doi.org/10.17519/apiculture.2018.11.33.4.239>
- Liang, X., Gao, M., Amanullah, S., Guo, Y., Liu, X., Xu, H., Liu, J., Gao, Y., Yuan, C., & Luan, F. (2022). Identification of QTLs linked with watermelon fruit and seed traits. *Scientia Horticulturae*, 303, 111237.
- Lu, K., Sun, J., Li, Q., & Jin, S. (2021). Effect of cold stress on growth, physiological characteristics, and Calvin-cycle-related gene expression of grafted watermelon seedlings of different gourd rootstocks. *Horticulturae*, 7(10), 391.  
<https://doi.org/10.3390/horticulturae7100391>
- Maggi, T., Pardo, L., & Chreil, R. (2023). Pollinator diversity: A key to ecosystem resilience and food security. *Pollinators*, 6, 33–48.
- Malambane, G., Batlang, U., Ramolekwa, K., Tsujimoto, H., & Akashi, K. (2021). Growth chamber and field evaluation of physiological factors of two watermelon genotypes. *Plant Stress*, 2, 100017.  
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100017>
- Mashilo, J., Shimelis, H., Maja, D., & Ngwepe, R. M. (2022). Retrospective genetic analysis of qualitative and quantitative traits in sweet watermelon (*Citrullus lanatus* var. *lanatus*): A review. *Agronomy*, 12(7), 1633.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy12071633>
- Millard, J., Outhwaite, C. L., Ceaușu, S., Carvalho, L. G., da Silva e Silva, F. D., Dicks, L. V., Ollerton, J., & Newbold, T. (2023). Key tropical crops at risk from pollinator loss due to climate change and land use. *Science Advances*, 9(41), 1–14.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0756>
- Nielsen, A., Reitan, T., Rinvoll, A. W., & Brysting, A. K. (2017). Effects of competition and climate on a crop pollinator community. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 246, 253–260.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.006>
- Prasifka, J. R., Mallinger, R. E., Portlas, Z. M., Hulke, B. S., Fugate, K. K., Paradis, T., Hampton, M. E., & Carter, C. J. (2018). Using nectar-related traits to enhance crop-pollinator interactions. *Frontiers in Plant Science*, 9, 812.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00812>
- Rahimi, E., & Jung, C. (2024a). A global estimation of potential climate change effects on pollinator-dependent crops. *Agricultural Research*, 14(6), 812–822.  
<https://doi.org/10.1007/s40003-024-00802-x>
- Rahimi, E., & Jung, C. (2024b). Global trends in climate suitability of bees: Ups and downs in a warming world. *Insects*, 15(2), 127.  
<https://doi.org/10.3390/insects15020127>
- Ren, K., Tang, T., Kong, W., Su, Y., Wang, Y., Cheng, H., Yang, Y., & Zhao, X. (2025). Response of watermelon to drought stress and its drought-resistance evaluation. *Plants*, 14, 1289.  
<https://doi.org/10.3390/plants14091289>
- Samanta, S., Senapati, S. K., Ganaie, M. H., Maji, A., Sarkar, S. K., Das, M., & Banerjee, S. (2025). Impact of climate change and global warming on crop pollinators and their mitigation strategies: A review. *Agricultural Reviews*, 46(5), 712–720.  
<https://doi.org/10.18805/ag.R-2684>
- Sawe, T., Nielsen, A., Totland, Ø., Macrice, S., & Eldegård, K. (2020). Inadequate pollination services limit watermelon (*Citrullus lanatus*) yields in northern Tanzania. *Basic and Applied Ecology*, 45, 35–45.
- Trunschke, J., Junker, R. R., Kudo, G., Alexander, J. M., Richman, S. K., & Till-Bottraud, I. (2024). Effects of climate change on plant-pollinator interactions and its multitrophic consequences. *Alpine Botany*, 134(2), 115–121.  
<https://doi.org/10.1007/s00035-024-00316-w>
- Wahyudi, A., Sari, M. F., & Hendrianto, Y. (2024). Karakteristik morfologi 12 galur murni semangka (*Citrullus lanatus*) generasi F5. *Jurnal Agrotek Tropika*, 12(1), 12–20.  
<https://doi.org/10.23960/jat.v12i1.6892>
- Yaseen, I., Choi, S., Mukhtar, T., Park, J. I., & Kim, H. T. (2025). Quantification of growth and physiological characteristics in tolerant and sensitive watermelon lines under cold treatment. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 66, 189–204.  
<https://doi.org/10.1007/s13580-024-00663-x>
- Zamuz, S., Muneke, P. E. S., Gullón, B., Rocchetti, G., Montesano, D., & Lorenzo, J. M. (2021). *Citrullus lanatus* as a source of bioactive components: An up-to-date review. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 208–222.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.002>