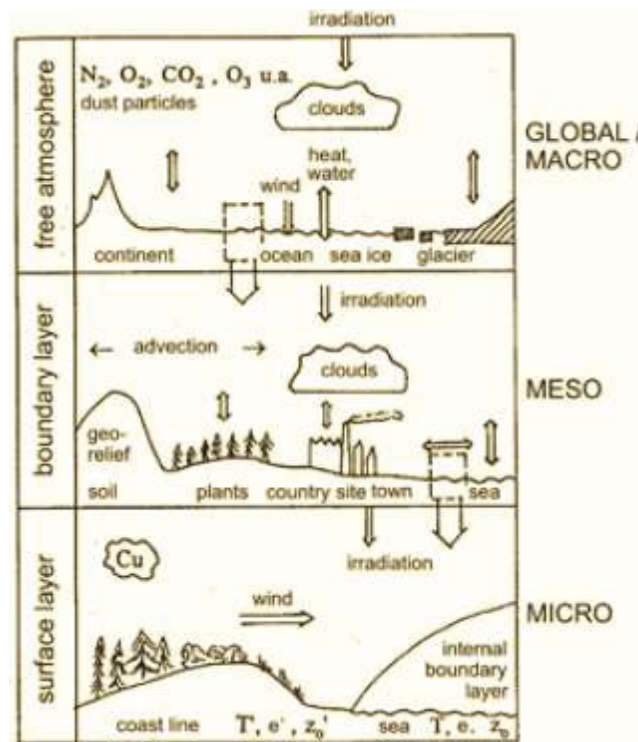


Bab II Tinjauan Pustaka

II.1 Mikroklimat

Mikroklimat adalah serangkaian kondisi iklim yang diukur di suatu daerah yang terlokalisasi di dekat permukaan bumi (Naiman dkk, 2005; Geiger, dkk., 2009). Mikroklimat juga didefinisikan sebagai iklim yang khas dari suatu area dalam skala kecil (Met Office, 2019). Lebih spesifik lagi, mikroklimat didefinisikan pula sebagai iklim tempat tumbuhan dan hewan hidup (Rosenberg, 1974 dalam Suggitt dkk., 2014). Menurut Mislan dan Helmuth (2008), konsep ekologi mikroklimat sangat tergantung pada permasalahan yang sedang dibahas. Cakupan luas area yang digunakan akan berbeda-beda menyesuaikan dengan objek yang dikaji. Foken (2008) menyebutkan bahwa mikroklimat sering kali diterapkan pada skala ruang hingga 100 m, yang diikuti oleh mesoklimat yang memiliki jangkauan hingga 100 km, kemudian diikuti oleh makroklimat di atasnya (Gambar II.1).

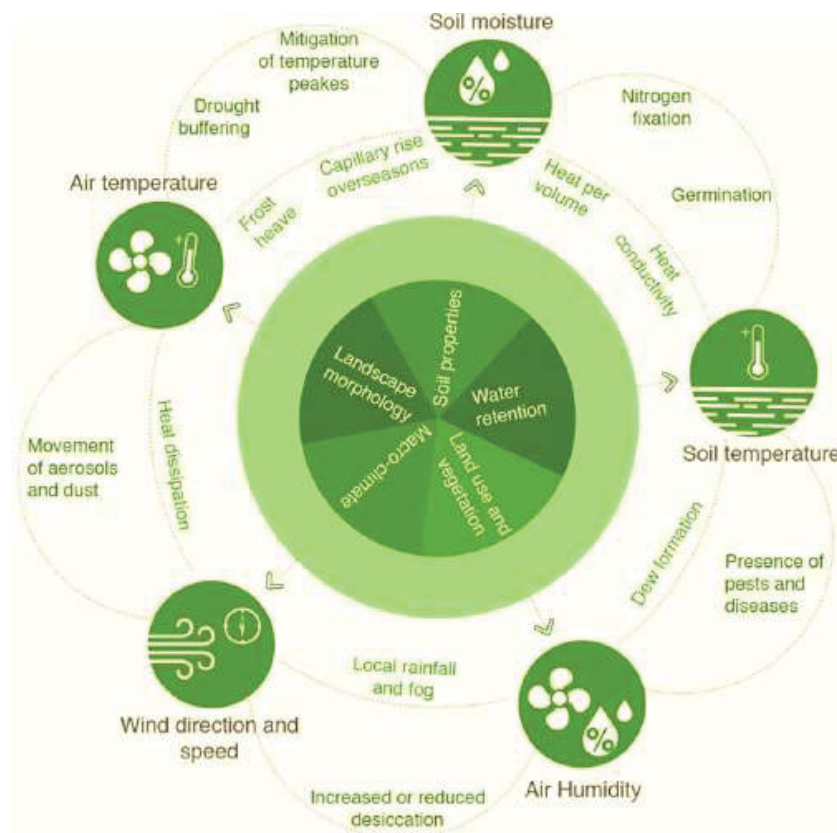


Gambar II.1. Skala pada iklim beserta fenomenanya (Foken, 2008)

Makroklimat adalah iklim yang membentang di wilayah yang lebih luas daripada mikroklimat (Buyse, 2018). Menurut Geiger dkk. (2009) makroklimat memiliki

ukuran horizontal lebih dari 200 km dan ukuran vertikal 1 sd 10 km, sebaliknya, mikroklimat memiliki ukuran horizontal dari 1 mm hingga 100 m dan ukuran vertikal dari -10 hingga 10 meter. Dengan demikian, makroklimat dapat tersusun atas banyak mikroklimat (Buyse, 2018). Kondisi mikroklimat pun dapat memengaruhi kondisi makroklimat yang lebih besar (Geiger dkk, 2009).

Mikroklimat adalah variabel lingkungan yang kompleks, perubahan pada salah satu variabel akan menyebabkan perubahan pada variabel lainnya (Jones, 1985). Kondisi mikroklimat dipengaruhi oleh faktor-faktor fisik seperti suhu, kelembapan, angin, embun, evaporasi, tipe tanah, topografi, ketinggian, musim, cahaya, dan curah hujan yang saling berkaitan (Gambar II.2) (Naiman dkk, 2005; Met Office, 2019; Britannica, 2020). Mikroklimat juga dipengaruhi oleh faktor biotik seperti kanopi vegetasi (Britannica, 2020). Naungan pohon menjadi penyangga (*buffer*) bagi sebagian besar variabel mikroklimat (Karki dan Goodman, 2015; Siegert dan Levia, 2011; von Arx dkk., 2012).



Gamabr II.2 Komponen iklim mikro dan keterkaitannya (Ismangil dkk., 2016)

Naungan dapat memengaruhi fluktuasi iklim mikro (Lin, 2007). Sebagai contoh, tanaman kopi yang ditanam dibawah naungan menerima suhu lebih rendah 5°C saat siang hari dan 0.5°C lebih tinggi saat malam hari dibandingkan dengan suhu di luar naungan (Ehrenbergerová dkk., 2018). Pohon penanang dapat melindungi tanaman kopi dari variasi suhu yang besar yang berpotensi mengganggu proses fisiologisnya (Siles dkk., 2010). Naungan bermanfaat untuk pertumbuhan dan produksi kopi dalam kondisi iklim suboptimal (Vaast dkk., 2008). Namun penting untuk mengatur kuantitas naungan tidak terlalu rapat agar terhindar dari pertumbuhan jamur penyakit karat daun dan bercak daun akibat iklim mikro yang sangat lembab (Wintgens, 2004; Avelino dkk., 2007).

Heterogenitas iklim mikro secara substansial dapat mengurangi risiko kepunahan hayati dari dampak perubahan iklim (Suggitt dkk., 2018). Iklim mikro menjadi *buffer* bagi komunitas tumbuhan dan serangga untuk bertahan dari kepunahan dengan tetap menyediakan kondisi lingkungan yang menguntungkan di tengah peningkatan suhu akibat perubahan iklim (Maclean dkk., 2015; Suggitt dkk., 2018). Dengan demikian, iklim mikro harus dipertimbangkan secara memadai untuk memprediksi masa depan ekosistem (Gaudio dkk., 2017).

Britannica (2020) menyebutkan bahwa iklim mikro dapat memengaruhi cuaca. Tanah yang basah dapat mendorong evaporasi lebih tinggi sehingga meningkatkan kelembapan udara di atmosfer (Britannica, 2020). Semakin tinggi kelembapan udara, maka semakin tinggi curah hujan (Mawonike dan Mandonga, 2017). Iklim mikro mengontrol evaporasi dan transpirasi dari permukaan dan memengaruhi presipitasi, kedua proses tersebut juga penting untuk siklus air di bumi (Britannica, 2020).

II.2 *Coffea arabica*

Genus *Coffea* merupakan genus yang paling populer diantara famili Rubiaceae. Nilai komersialnya yang tinggi menyebabkan genus *Coffea* banyak dibudidayakan. *Coffea arabica* merupakan salah satu spesies kopi yang banyak dibudidayakan di dataran tinggi. Jenis kopi ini ideal ditanam pada ketinggian 1.200-2.000 mdpl

dengan curah hujan tahunan 1.400-2000 mm/tahun (ICCRI, 2016). Tanaman ini merupakan tanaman tahunan yang memerlukan kehadiran pohon penayang untuk mengoptimalkan hasil panennya (Bote dan Struik, 2011).

Tanah merupakan salah satu faktor terpenting yang menentukan produktivitas kopi (Almonte, 2008). Avelino dkk. (2002) melaporkan bahwa keasaman dan tekstur tanah dapat memengaruhi kualitas biji kopi. Tanaman kopi menghendaki tekstur tanah berlempung (*loamy*) disertai dengan kadar unsur hara makro N, posfor (P), dan kalium (K) yang cukup hingga tinggi (Balittri, 2020). Kekurangan kalium berdampak pada ukuran buah (Nzeyimana dkk., 2013). Kekurangan nitrogen berpengaruh besar terhadap perkembangan vegetatif, sehingga berpotensi mengurangi fotosintesis (Cordingley, 2009). Fosfor pada kopi berperan dalam perkembangan bunga yang nantinya dapat memengaruhi jumlah produksi kopi (Nzeyimana dkk., 2013). Kadar fosfor yang rendah dapat memengaruhi ukuran biji kopi (Cordingley, 2009).

Boron merupakan salah satu unsur hara mikro yang penting pada tanaman kopi (Vinh dan Anh, 2007). Kekurangan boron mengakibatkan berkurangnya sistem perakaran, aborsi pada bunga, gugur buah dan malformasi pada buah yang berdampak pada rendahnya hasil panen (Malavolta, 1986; Malavolta dkk., 2001; Cong, 2017; Clemente dkk., 2018).

II.2.1 Bunga

Bunga kopi arabika terbentuk pada cabang aksila (ketiak daun). Pada setiap aksila terdapat 4-5 tandan yang masing-masing terdiri atas 3-5 bunga. Pada kondisi optimal, bunga kopi dapat mencapai 6.000-8000 bunga/pohon, namun hanya 30-50% saja yang berkembang menjadi buah (ICCRI, 2016).

Kehadiran hujan berperan penting saat periode pembungaan tanaman kopi. Perubahan pola curah hujan dapat mengubah fenologi pembungaan (Peters dan Carroll, 2012). Anthesis bunga kopi dipengaruhi oleh curah hujan. Anthesis pada bunga kopi merupakan respons terhadap hujan setelah periode stres kelembapan

(Alvim, 1973). Bunga kopi mekar dalam beberapa periode (2-3 periode mekar sedikit, 1 periode mekar banyak/massal) dan umumnya setiap bunga mekar selama tiga hari (Peters, 2010).

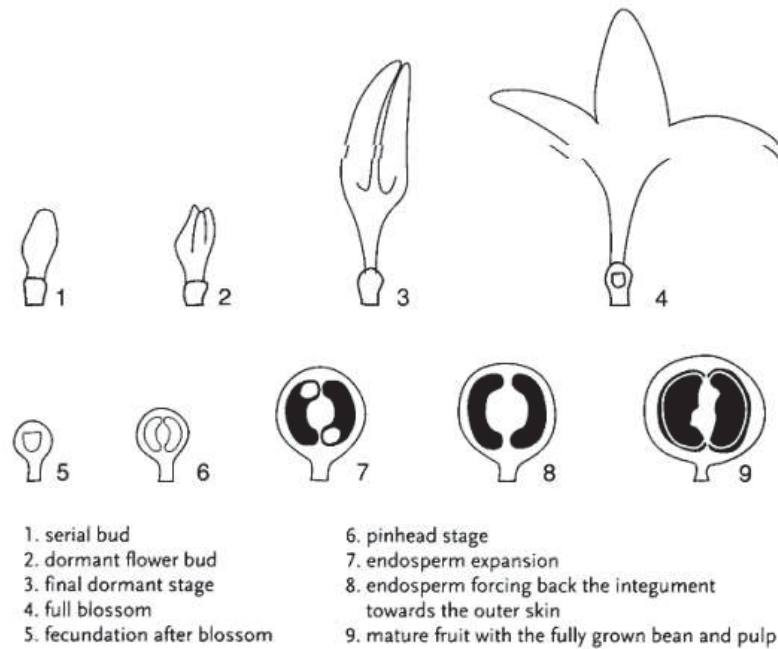
Bunga kopi arabika berwarna putih dan beraroma seperti melati (Stashenko, 2013). Daya tarik visual dan atau petunjuk aroma (*olfactory cues*) penting dalam menarik serangga pengunjung (Raguso, 2008). Selain warna dan aroma, bentuk, panjang tabung bunga, ketersediaan nektar dan polen serta kualitas nektar pada bunga kopi arabika diketahui memiliki karakter yang berkaitan dengan preferensi kunjungan serangga khususnya serangga penyerbuk (Sari dan Putra, 2015). Menurut Silva dan Torezan-Silingardi (2008) bunga yang penyerbukannya dibantu oleh serangga seperti lebah dan kupu-kupu, memiliki karakter sebagai berikut: waktu anthesis siang hari, warna bunga cerah, beraroma, berbentuk tabung, bentuk simetri radial (*zygomorphic*), memiliki nektar dengan letaknya tersembunyi.

Menurut Sari dan Putra (2015) bentuk bunga kopi arabika adalah majemuk tak terbatas (*inflorescentia racemosa*) dan dapat ditemukan pada hampir setiap ruas cabang, hal ini dapat memberikan *landing platform* yang lebih luas bagi serangga pengunjung (Gambar II.3). Istilah lokal penyebutan bunga majemuk pada bunga kopi adalah dompol bunga. Bunga ini juga menyediakan polen dan nektar yang tinggi kadar gula. Kadar gula nektar tiap bunga berkisar antara 1µl-6µl dengan kadar gula sebesar 28,4-31,1% (Sari dan Putra, 2015). Posisi nektar tersembunyi berada di dasar tabung bunga tepat di atas receptaculum yang relatif mudah dijangkau oleh serangga pengunjung (Sari dan Putra, 2015).

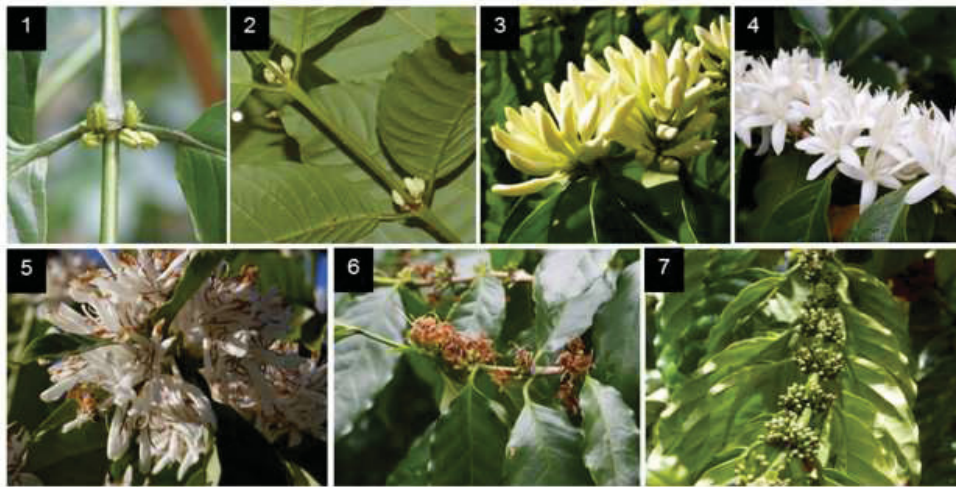
Ovarium bunga kopi terdiri atas dua bakal biji (ovule) yang mulai berkembang sesaat setelah fertilisasi terjadi. Selama dua bulan pertama, ovarium berkembang dengan lambat dan bahkan mengalami dormansi hingga lingkungan menstimulasi anthesis bunga (Carla, 2011) (Gambar II.4). Fase dormansi akhir pada kuncup bunga disebut fase lilin (*white candle*), karena kuncup bunga berada dalam bentuk kuncup memanjang berwarna putih (Gambar II.5). Bunga yang berhasil fertilisasi akan berkembang terus selama 9 bulan hingga menjadi buah yang masak (Carla, 2011).



Gambar II.3 Morfologi bunga kopi arabika dengan tipe perbungaan majemuk (*inflorescentia racemosa*). Sumber foto: Dokumentasi pribadi



Gambar II.4 Perkembangan buah kopi dari kuncup hingga buah masak (Wintgens, 2004)



Gambar II.5 Fenologi bunga kopi. Tujuh tahap perkembangan kuncup kopi yang berbeda sepanjang peristiwa pembungaan dijelaskan sebagai berikut: tahap 1 = tandan hijau (*green cluster*), 2 = tandan putih (*white cluster*), 3 = lilin putih pertama (*first white candle*), 4 = bunga mekar (antesis), 5 = viabilitas serbuk sari akhir (*end of pollen viability*), 6 = reseptif putik akhir (*end of style receptivity*), 7 = buah kopi hijau awal (*pinhead fruit*). (Gomez dkk., 2016).

II.2.2 Buah

Tanaman kopi umumnya berbunga pada usia 3 tahun dan berbuah di usia 4 tahun (Carla, 2011). Proses pematangan buah kopi arabika membutuhkan waktu 9-10 bulan dari sejak fertisasi hingga buah masak berwarna kemerahan (ICCRI, 2016).

Wormer (1964) mengklasifikasikan biji kopi kedalam dua kategori, yaitu biji normal dan abnormal. Biji kopi normal didefinisikan sebagai biji kopi yang terbentuk dari dua bakal buah yang berkembang sempurna menjadi dua biji dengan bentuk dan ukuran yang serupa. Biji kopi tanpa isi (*empty bean*), berkeping tunggal (*pea berry*), berkeping besar (*elephant bean*) dan berkeping tiga (*triase bean*) termasuk ke dalam kategori biji kopi abnormal (Nugroho dkk., 2016).

Pea berry dapat disebabkan oleh polinasi yang tidak sempurna karena kondisi lingkungan yang tidak mendukung saat polinasi terjadi dan juga disebabkan oleh faktor genetik tanaman (Eskes dan Leroy, 2004). Curah hujan yang tinggi dapat mengganggu proses polinasi dan menyebabkan biji kosong atau biji tunggal

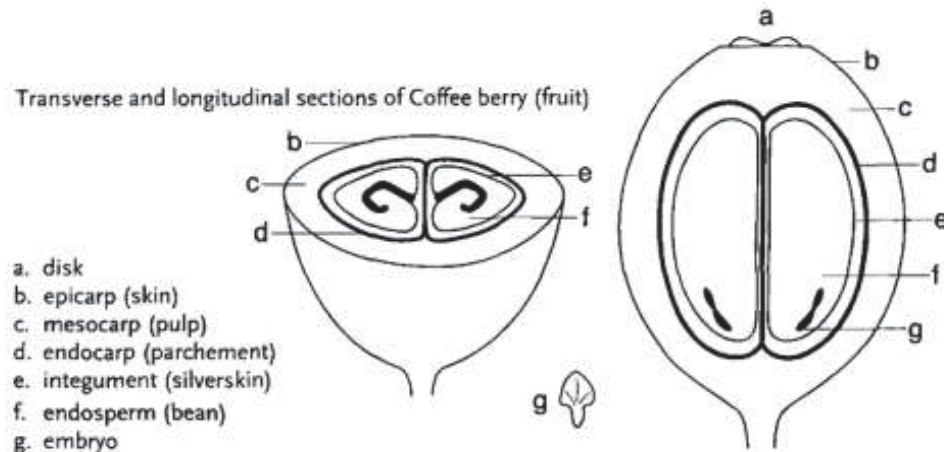
(Nugroho dkk., 2016). Menurut Ricketts dkk. (2004) dan Syamsudin dan Anggraeni (2007), kehadiran serangga penyerbuk dapat mengurangi produksi *pea berry*. Kondisi ini menunjukkan bahwa pembentukan *pea berry* sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan keberhasilan penyerbukan (Nugroho dkk., 2016)

Bunga kopi arabika terkadang menghasilkan tiga bakal biji (ovule) yang berkembang sempurna menjadi tiga biji kopi (*triase*) dalam satu buah dengan ukuran yang lebih kecil dari pada ukuran biji kopi normal (Gambar II.6) (Mawardi dan Hulupi, 1995). Menurut Wormer (1964), pembentukan biji *triase* disebabkan oleh penyimpangan genetik. Namun, Nugroho dkk. (2016) menemukan bahwa kopi yang ditanam di dataran tinggi cenderung menghasilkan *triase* yang lebih banyak dibandingkan kopi yang ditanam di dataran rendah. Hal ini menunjukkan bahwa faktor genetik tanaman dan lingkungan berperan dalam terbentuknya biji kopi abnormal.



Gambar II.6 Biji kopi tunggal (*pea berry*), regular (normal), tiga (*triase*). Sumber foto: <https://www.beanground.com/peaberry-coffee/>

Pada biji kopi terdapat endosperm yang mengandung embrio yang dibungkus oleh lapisan tipis integumen (*silverskin*) dan lapisan tebal endokarp (*parchment*). Seluruh bagian biji tersebut dibungkus oleh lapisan mesokarp (*pulp*) yang berupa daging buah berlendir dan oleh epikarp (*outer skin*). Anatomi buah kopi selengkapnya dapat dilihat pada Gambar II.7.



Gambar II.7 Sayatan melintang dan memanjang buah kopi (Wintgens, 2004)

II.3 Senyawa volatil organik (*Volatile organic compounds*)

Senyawa volatil organik adalah senyawa organik dengan berat molekul rendah yang mudah menguap pada suhu ruang (Anand dkk., 2014). Tumbuhan menghasilkan senyawa volatil organik untuk menarik penyerbuk, melindungi dari stres lingkungan dan untuk mengusir herbivora tertentu (Farré-Armengol dkk., 2016). Senyawa volatil ini sangat penting untuk siklus hidup tumbuhan dalam menjamin keberhasilan reproduksi (Knudsen dan Gershenzon, 2006).

Sebanyak lebih dari 1700 senyawa aroma bunga telah diidentifikasi (Knudsen dkk., 2006). Aroma bunga adalah metabolit sekunder dengan berat molekul rendah yang dilepaskan oleh bunga yang terdiri atas banyak senyawa volatil, termasuk terpen, aromatik benzen, dan turunan asam lemak (Dudareva dkk., 2013).

Aroma bunga merupakan ciri penting pada tanaman berbunga dan juga merupakan faktor penting dalam evolusi karena senyawa volatil ini menjadi sinyal penciuman bagi serangga penyerbuk (Borghi dkk., 2017). Aroma bunga memediasi interaksi antara tumbuhan dan polinator (Klatt, 2013; Bouwmeester dkk., 2019). Senyawa tersebut menarik dan memandu serangga penyerbuk untuk datang mengunjungi bunga (Reinhard dkk., 2004). Kunjungan tersebut secara tidak langsung membantu proses penyerbukan dan membantu keberhasilan reproduksi tumbuhan berbunga.

II.3.1 Senyawa volatil organik pada bunga kopi

Emura dkk. (1997) menemukan 47 senyawa dari bunga kopi yang didominasi oleh senyawa aromatik. Bunga kopi mengandung senyawa volatil yang sangat beragam, beberapa diantaranya nerol, geraniol, neral, geranial, linalool, citronellol, limonene, trans- β -ocimene, myrcene, benzaldehyde, methyl salicylate, benzyl alcohol, dan indole (Stashenko, 2013). Bunga kopi memancarkan aroma khas yang mirip dengan aroma melati (Emura dkk., 1997).

Sekitar 150 senyawa bunga kopi arabika ditemukan oleh Stashenko dkk. (2013) yang diisolasi melalui teknik ekstraksi *headspace* dan distilasi dari bunga yang dianalisis menggunakan *Gas chromatography–mass spectrometry* (GC-MS). Meskipun jenis senyawa volatil bunga kopi telah ditemukan namun informasi mengenai keterkaitan sekresi senyawa volatil tersebut terhadap kehadiran serangga pengunjung bunga kopi masih belum diketahui.

II.4 Serangga pengunjung bunga

Peran serangga dari sudut pandang manusia dikelompokkan menjadi dua yakni serangga yang menguntungkan dan merugikan (Siregar, 2019). Serangga yang menguntungkan diantaranya; serangga penyerbuk, pengendali hayati “predator”, pengendali hayati “parasitoid” dan penghasil produk, sedangkan yang merugikan diantaranya; serangga hama dan vektor penyakit. Sebagian besar peran serangga tersebut berkaitan erat dengan keberadaan tumbuhan. Menurut Strong dan South (1984), peran serangga di ekosistem yang juga berkaitan dengan tumbuhan adalah sebagai herbivora, karnivora dan detritivora.

Hubungan antara serangga dengan tanaman dipengaruhi oleh perilaku serangga selama mencari makan dan oviposisi (Jones dan Agrawal, 2017). Polinator bersifat lebih *generalist* (berinteraksi dengan banyak jenis tanaman), sedangkan herbivor lebih *specialist* (berinteraksi dengan sedikit spesies tanaman) terbatas pada tanaman yang memiliki hubungan erat saja (Fontaine dkk, 2009). Hubungan interaksi antara herbivora dengan tanaman pun sangat kontras jika dibandingkan dengan interaksi polinator dengan tanaman. Interaksi herbivora dengan tanaman umumnya bersifat

antagonis, sedangkan polinator bersifat mutualistik (Jones dan Agrawal, 2016). Interaksi keduanya dengan tanaman tentu akan memengaruhi panen yang dihasilkan. Kehadiran penyerbuk berpotensi meningkatkan hasil panen, sedangkan herbivor sebaliknya (berpotensi menurunkan hasil panen) (Klein, 2002; Albrecht, 2012; Aranda dkk., 2018).

Serangga secara umum mengunjungi bunga disebabkan oleh faktor lingkungan dan faktor penarik yang terdapat pada bunga. Faktor lingkungan yang memengaruhi kehadiran serangga pengunjung bunga diantaranya suhu, kelembapan, intensitas cahaya, serta kecepatan angin (Hirota dkk., 2012). Adapun faktor penarik pada bunga yang memengaruhi kunjungan serangga yaitu bentuk, warna, serbuk sari, kandungan nektar (sebagai penarik primer) dan aroma bunga (sebagai penarik sekunder) (Faheem dkk., 2004; Hirota dkk., 2012).

Faktor lain yang juga berpengaruh terhadap kunjungan serangga pada bunga adalah jarak dan tempat mencari makan. Jarak mencari makan (*foraging distance*) merupakan komponen penting untuk memahami interaksi spesies (Greenleaf dkk., 2007). Jarak mencari makan dapat memengaruhi interaksi komunitas yang memiliki konsekuensi pada level ekosistem salah satunya polinasi (Ritchie dan Olff 1999). Semakin dekat jarak sumber makanan dengan sarang, dapat meningkatkan jumlah kunjungan serangga (Klein dkk., 2003; Sritongchuay dkk., 2016) dan meningkatkan peluang polinasi pada tanaman. Banyak lebah penyerbuk bersarang di habitat alami dan mencari makan dalam jarak tempuh yang biasa mereka lakukan sehari-hari (Ricketts, 2004). Dengan demikian, jarak mencari makan pada serangga dapat menentukan layanan penyerbukan pada tumbuhan (Kremen, 2002). Jarak mencari makan serangga dapat lebih pendek dari jarak terbang maksimumnya, jika dihadapkan pada kondisi cuaca atau sumber makan yang tidak memadai (*poor reward*) (Pasquet dkk., 2008).

Daerah jelajah (*home range*) setiap spesies berbeda-beda dan dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya faktor kualitas makanan dan ukuran tubuh serangga. Pada lebah madu, jarak terbang terjauh dapat mencapai 8 kilometer dari sarang, itu

pun jika pada lokasi yang dituju terdapat sumber makanan yang berkualitas (Ribbands, 1951). Berbeda dengan spesies *Tetragonula sp* yang ukuran tubuhnya lebih kecil, *stingless bee* ini diketahui memiliki jarak terbang kurang dari satu kilometer (Smith dkk., 2017).

Selain jarak, tempat mencari makan (*foraging range*), pun merupakan komponen penting dari ekologi serangga (terutama lebah), karena dapat menentukan potensi persilangan antar individu (Pasquet dkk., 2008). Semakin besar ukuran serangga, umumnya jarak mencari makan bisa semakin jauh dan area mencari makan bisa menjadi semakin luas (Roland and Taylor 1997).

Serangga pengunjung bunga umumnya didominasi oleh kelompok lebah, lalat, kumbang dan kupu-kupu (Siregar dkk., 2019). Ordo Hymenoptera dilaporkan sebagai serangga pengunjung terpenting karena perannya sebagai penyerbuk (Tylianakis dkk., 2007). Serangga merupakan penyerbuk paling umum dan paling banyak pada tanaman berbunga (Kevan, 2004).

Interaksi yang terjadi antara bunga dan serangga pengunjung dapat membantu proses penyerbukan terutama pada bunga yang tidak dapat melakukan penyerbukan sendiri (Aizen dan Feinsinger, 2003). Serangga mengunjungi bunga untuk memperoleh makan (nektar/polen) (Bezzi dkk., 2010). Namun aktivitasnya saat mencari makan di bunga, tanpa disengaja telah memindahkan polen ke kepala putik bunga (polinasi) dan secara tidak langsung membantu terjadinya proses fertilisasi (Brandenburg dkk., 2009)

Polinasi merupakan salah satu jasa ekosistem terbaik yang digunakan untuk mempelajari keterkaitan kualitatif antara penyedia dan penerima manfaat (Albrecht, 2012). Serangga polinator berperan penting dalam polinasi sejumlah besar spesies tumbuhan (Klein, 2003). Diperkirakan 67% hingga 96% dari tumbuhan diseluruh dunia memanfaatkan hewan untuk perpindahan polen (Patrício-Roberto dan Campos, 2014). Di daerah tropis, lebih dari 94% tumbuhan tergantung pada jasa polinator (Patrício-Roberto dan Campos, 2014).

Diversitas dan efektivitas polinator dipengaruhi oleh banyak faktor seperti faktor aktivitas manusia, faktor biologis dan faktor iklim (Petanidou dan Ellis, 1996). Kondisi mikroklimat (suhu, kelembapan udara dan intensitas cahaya) dapat memengaruhi keanekaragaman serangga (Amano dkk., 2000). Perubahan iklim dapat berdampak pada penurunan banyak famili polinator (Biesmeijer dkk., 2006 dalam Stojnic dkk., 2012). Hal ini akan mengancam proses reproduksi tumbuhan yang sangat bergantung pada serangga polinator sebagai agen polinasinya. Oleh sebab itu, perubahan iklim akan menjadi ancaman serius bagi ketersediaan jumlah dan kualitas pangan dunia.

II.5 Polinasi pada tanaman kopi

Coffea canephora (robusta) dan *Coffea arabica* (arabika) merupakan dua jenis kopi komersial yang banyak dibudidayakan di banyak negara tropis. Kopi arabika bersifat *self – fertil* sedangkan kopi robusta bersifat *self-steril* (Rehm dan Espig 1991; Free, 1993). Meskipun bersifat *self – fertil*, namun penelitian Raw dan Free (1977) menunjukkan bahwa polinasi oleh lebah madu yang ditangkar (*Apis mellifera* L.) dapat menggandakan hasil panen kopi arabika dibandingkan dengan hasil polinasi (spontan) sendiri (Reddy dkk., 1988; Free, 1993; Roubik, 2002).

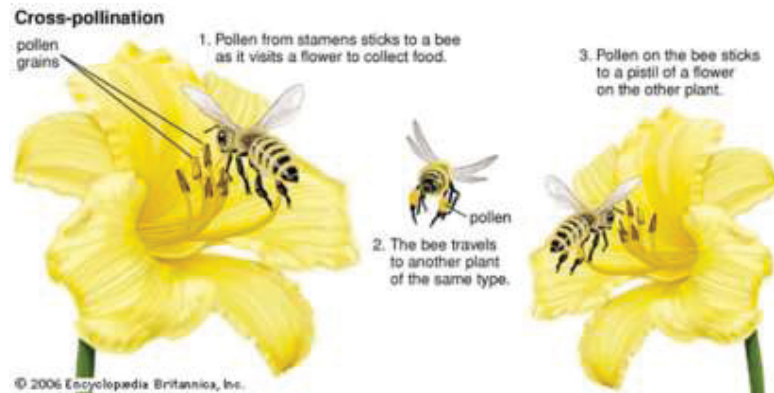
Bunga kopi sering dikunjungi oleh lebah selama periode berbunga (Gambar II.8) (Raw dan Free, 1977; Klein dkk., 2002). Fertilisasi yang dibantu oleh polinator dapat meningkatkan terbentuknya buah dan berat biji (Olscheski dkk., 2006). Sejumlah buah yang dihasilkan meningkat seiring dengan penyerbukan silang oleh lebah (Gambar II.9) (Klein dkk., 2003; Roubik 2002).

Secara umum, sejumlah penelitian pada buah-buah komersial menunjukkan bahwa polinator berperan dalam peningkatan kualitas hasil panen. Deformasi buah tidak selalu dipengaruhi oleh faktor genetik, tetapi juga oleh faktor lingkungan seperti suhu (Ariza dkk., 2010) dan ketiadaan polinator (Klatt, 2013a). Polinasi oleh lebah mengurangi malformasi buah, meningkatkan daya simpan dan menambah warna merah pada strowberi sehingga meningkatkan harga jual di pasaran (Klatt, 2013a). Buah apel yang tidak dipolinasi lebah menunjukkan bentuk yang kurang baik dan

berat yang rendah (Garratt dkk., 2014). Penyerbukan oleh serangga juga dapat meningkatkan kualitas rasa, vitamin, mineral yang terkandung didalam buah (Eilers dkk., 2011). Tanaman yang dipolinasi oleh serangga menyediakan beragam diet dan nutrisi penting bagi kesehatan manusia (Free, 1993). Jika jumlah, keanekaragaman dan layanan polinator mengalami penurunan maka hal ini dapat memengaruhi kesehatan manusia.



Gambar II.8 Lebah mengunjungi bunga kopi arabika yang sedang mekar. Sumber gambar: Dokumentasi pribadi



Gambar II.9 Polinasi silang oleh lebah (Britannica, 2006). Sumber gambar: <https://www.britannica.com/science/cross-pollination>

Informasi pengaruh serangga penyerbuk terhadap kualitas buah kopi, masih belum banyak diketahui. Terdapat dua penelitian terkait hubungan penyerbuk dengan kualitas buah kopi yakni penelitian Ricketts dkk. (2004) dan Syamsudin dan Anggaraeni (2007), yang menunjukkan bahwa kehadiran serangga penyerbuk dapat meningkatkan kualitas kopi dengan menurunkan persentase terbentuknya *pea berry*.

II.6. Produksi dan nilai ekonomi tanaman kopi

Dari 100 genus kopi pada famili Rubiaceae, *Coffea arabica* dan *Coffea canephora* merupakan dua jenis kopi yang paling banyak diperdagangkan dan bernilai komersial tinggi (Batista dkk., 2016). Terutama arabika, lebih dari 95% kebutuhan kopi dunia didominasi oleh kopi jenis ini (Vega dkk., 2003). Kopi merupakan komoditas minuman paling berharga yang dipasarkan di dunia, bahkan dalam beberapa tahun telah melampaui perdagangan minyak (ICO, 2020).

Produksi kopi dunia sepanjang 2018-2019 mencapai lebih dari 10 juta ton (ICO, 2020). Indonesia sendiri merupakan negara penghasil kopi terbesar ke-4 setelah Brazil, Vietnam dan Colombia. Produksi kopi di Indonesia selama pada tahun 2018 mencapai 577.080 ton (ICO, 2020). Jumlah tersebut memenuhi kebutuhan permintaan kopi dunia sebesar 5.5%.

Tanaman kopi ditanam di lebih dari 60 negara di dunia dengan luas perkebunan lebih dari 11 juta hektar (Waller dkk., 2007). Agrobisnis kopi melibatkan sekitar setengah milyar orang atau sekitar 8% populasi manusia dunia dalam manajemennya, mulai dari penanaman hingga konsumsi akhir (Da Matta dkk., 2007; Batista dkk., 2016). Produksi kopi berkontribusi signifikan terhadap pendapatan pertanian dan pemasukan ekspor bagi negara penghasil kopi (Waller dkk., 2007).

Kualitas merupakan atribut penting pada kopi (Muschler., 2001) baik secara fisik maupun cita rasa (*specialty*). Hanya kopi berkualitas baik saja yang dapat diperjualbelikan di level internasional (ekspor). Kopi kualitas ekspor memiliki standar fisik yang ketat yang ditetapkan oleh *International Coffee Organization* (ICO). Indonesia sendiri telah menetapkan standar ekspor biji kopi berdasarkan sistem nilai cacat kopi. Standar mutu kopi yang berlaku saat ini adalah Standar Nasional Indonesia No. 01-2907-2008 yang mengacu pada resolusi ICO nomor 407 tentang “*Coffee quality improvement program*” (AEKI, 2016).

II.7. Metabolit sekunder biji dan cita rasa kopi

Metabolit sekunder memainkan peran penting dalam proses adaptasi tumbuhan saat menghadapi cekaman lingkungan (Ramakrishna dan Ravishankar, 2011). Metabolit sekunder dapat menjadi jembatan untuk memahami interaksi antara lingkungan dan tumbuhan. Metabolit sekunder disintesis pada organ atau jaringan yang berbeda yang bergantung pada tahap pertumbuhan, dan responsnya terhadap pengaruh lingkungan baik biotik dan abiotik (Yang dkk., 2012).

Hafsah dkk (2020) menemukan 24 senyawa metabolit dari biji kopi normal dan 33 senyawa metabolit dari *pea berry* kopi. Metabolit sekunder kopi yang paling banyak dikaji adalah senyawa-senyawa metabolit yang terkait dengan cita rasa. Terdapat 28 jenis senyawa terkait cita rasa (*flavor*) pada biji kopi, diantaranya aldehid, alkohol, keton, ester, guanicol, vanilin dan lain-lain (Sheng dkk., 2020).

II.7.1 Senyawa fenolik dan antioksidan pada kopi

Senyawa fenolik merupakan salah satu metabolit sekunder yang paling melimpah di kerajaan tumbuhan dan merupakan senyawa yang umum terlibat dalam adaptasi tumbuhan menghadapi kondisi stres lingkungan (Farah dan Donangelo, 2006). Tumbuhan penghasil polifenol menarik untuk dikaji karena kemampuan antioksidannya.

Asam fenolik dibagi menjadi dua kelas: turunan asam benzoat seperti asam gallic, dan turunan asam sinamat seperti kumarat, kafeat dan asam ferulat. Asam kafeat adalah asam fenolik yang paling melimpah di banyak buah-buahan dan sayuran (Dai dan Mumper, 2010) tak terkecuali pada tanaman kopi. Sebagian senyawa fenolik pada tanaman kopi diketahui bertanggung jawab atas sifat organoleptik kopi (Dai dan Mumper, 2010). Kadar fenolik yang tinggi direpresentasikan dalam istilah *phenolic notes* yang diketahui dapat menurunkan cita rasa kopi (Lingle, 1993).

Phenolic notes adalah salah satu parameter penilaian cita rasa kopi yang mewakili aspek *defect* (cacat cita rasa) pada kopi (SCAA, 2015). Cacat pada cita rasa ini menggambarkan rasa yang negatif, sehingga dapat mengurangi penilaian cita rasa

kopi. Fenolik dapat menyebabkan kopi memiliki karakteristik aroma dan rasa yang negatif, seperti: *tarry*, *smokey*, *medicinal*, *woody*, dan *leathery*, yang dapat menutupi karakteristik *specialty* seperti: *fruity*, *floral*, *sweet acidic* pada kopi (Piccino dkk., 2014; Laukaleja dan Kruma, 2018).

Menurut Nicoli dkk. (1997) aktivitas antioksidan pada kopi berhubungan erat dengan kandungan CGA, ferulat, kafeat, dan n-kumarat yang terdapat di dalam biji kopi. Melanoidin (pigmen coklat) yang dihasilkan saat proses pemanggangan (*roasting*) kopi merupakan golongan antioksidan kuat (Steinhart dkk., 2001). Beberapa studi melaporkan bahwa kafein dan trigonelin juga berperan sebagai antioksidan pada kopi (Farah dkk., 2006).

Proses pemanggangan kopi dan letak geografi penanaman kopi memengaruhi kandungan dan aktivitas antioksidan. Kandungan antioksidan biji kopi hijau lebih tinggi dibandingkan pada biji kopi yang telah dipanggang (Castillo dkk., 2002). Antioksidan (poliphenol dan CGA) pada biji kopi arabika yang ditanam di Mexico kandungannya lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan antioksidan biji kopi yang ditanam di China (Mullen dkk., 2013).

II.7.2 Kafein dan *chlorogenic acid* (CGA) pada kopi

Diantara sekian banyak metabolit di biji kopi, kafein dan *chlorogenic acid* (CGA) adalah dua metabolit sekunder utama yang paling menentukan cita rasa kopi. Kafein merupakan senyawa metabolit alkaloid terbanyak yang terkandung di dalam biji kopi (Ashihara, 2006; Baumann dkk., 2006). Kafein diketahui berkontribusi menghadirkan rasa pahit (Trugo, 1984), sedangkan CGA berkontribusi terhadap rasa asam (Trugo dan Macrae, 1984; Buffo dan Cardelli-Freire, 2004) dan juga rasa pahit yang positif (disukai) (Trugo, 1984; Borem dan Andrade, 2020).

II.8 Uji cita rasa kopi : *Cupping test*

Rasa merupakan aspek penting pada minuman kopi. Cita rasa kopi dipengaruhi oleh banyak kandungan metabolit sekunder biji kopi. Senyawa metabolit terpenting pada kopi diantaranya senyawa diterpen (cafestol dan kahweol), trigonelin, asam nikotinat

(Niacin/Vitamin B3), fenolik (*chlorogenic acid* dan turunannya) dan kafein (Gomez-Ruiz dkk., 2007).

Cafestol dan kahweol merupakan senyawa asam lemak diterpen (Cheng dkk., 2016). Rasio cafestol dan kahweol kurang dari 1,2 diketahui berkorelasi dengan kualitas cita rasa yang tinggi (Novaes dkk., 2015) dan berkontribusi terhadap rasa pahit, sedangkan senyawa trigonelin yang merupakan turunan dari pyridin diketahui berkontribusi secara tidak langsung terhadap pembentukan aroma yang diinginkan (*desirable*) selama pemanggangan (Ky, 2001) dan menyumbang rasa pahit pada kopi (Borem dan Andrade, 2020). Asam nikotinat atau disebut juga niacin, terbentuk dari alkaloid trigonelin selama proses *roasting* (Buckel dkk., 2019). Niacin diketahui berperan memberikan rasa asam pada kopi (Borem dan Andrade, 2020). CGA pada kopi menyumbang rasa asam dan pahit, sedangkan kafein memberikan rasa pahit (Trugo, 1984).

Cupping test merupakan salah satu teknik mencicipi kopi untuk menilai aroma kopi dan profil rasa kopi dengan mengikuti protokol standar internasional yang telah ditetapkan (SCAA, 2015). Aspek-aspek yang dinilai saat *cupping* diantaranya *fragrance, flavour, acidity, body, balance, sweetness, clean cup, uniformity, aftertaste*, termasuk juga aspek *devective* pada kopi. Keseluruhan aspek tersebut dinilai oleh profesional *cupper* yang telah mengikuti pelatihan tertentu dan telah tersertifikasi oleh lembaga internasional *Specialty Coffee Association of America* (SCAA). Total nilai yang diperoleh akan menentukan kualitas kopi yang diuji. Semakin besar nilai uji *cupping* maka semakin tinggi cita rasa kopi tersebut (Tabel II.1).

Tabel II.1 Klasifikasi kualitas cita rasa kopi berdasarkan nilai uji *cupping* (SCAA, 2015)

Total Score Quality Classification		
90-100	Outstanding	Specialty
85-89.99	Excellent	
80-84.99	Very Good	
< 80.0	Below Specialty Quality	Not Specialty

SCAA (2015) mendeskripsikan parameter penilaian cita rasa kopi sebagai berikut; *Fragrance*, aroma serbuk kopi kering yang belum dan setelah diseduh. *Flavour*, karakter utama kopi yang dihasilkan dari seluruh sensasi indra pengecap dan *retronasal* (sensasi aroma saat kopi berada di dalam mulut) meliputi intensitas, kualitas, kompleksitas dari kombinasi antara rasa dan aroma. *Acidity*, rasa asam yang digambarkan sebagai rasa asam yang menyenangkan seperti pada buah segar. *Body*, tekstur yang bergantung pada kekentalan kopi. *Sweetness*, sensasi rasa manis buah. *Clean cup*, sensasi “bersih” tidak adanya faktor yang merusak rasa, mulai dari hirupan pertama sampai *aftertaste*. *Uniformity*, konsistensi rasa kopi pada beberapa cangkir yang berbeda saat pengujian, rasa yang berbeda-beda pada tiap cangkir akan mengurangi penilaian. *Aftertaste*, bertahanannya rasa dan aroma pada rongga mulut setelah kopi ditelan. *Defect*, rasa yang tidak menyenangkan yang mengurangi kualitas kopi. *Balance*, perpaduan seluruh aspek penilaian.