

Perubahan Iklim Mikro dan Produksi Kopi Arabika (*Coffea arabica* L.)
pada Daerah Aktivitas Geothermal PLTP Kamojang di Kabupaten Bandung

Nurrani Oktaviani¹, Abraham Suriadikusumah^{2*}, dan Mahfud Arifin²

¹Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran

²Departemen Teknologi Pengelolaan Tanah dan Sumber Daya Lahan, Fakultas Pertanian,
Universitas Padjadjaran

Jl. Raya Bandung-Sumedang KM 21 Jatinangor 45363

*Alamat korespondensi: abraham@unpad.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRACT/ABSTRAK
Diterima: 02-11-2023 Direvisi: 07-10-2024 Dipublikasi: 31-12-2024	Microclimate change and arabica coffee (<i>Coffea arabica</i> L.) production in the geothermal activity area of the Kamojang GPP in Bandung Regency
Keywords: Air humidity, Air temperature, Coffee production, Geothermal steam, Sunlight intensity	Arabica coffee is an essential plantation export commodity contributing significantly to Indonesia's economy. However, its production remains relatively low at 800 kg/ha. One of the Arabica coffee production centers in West Java is situated near the geothermal activity area of the Kamojang Geothermal Power Plant (GPP Kamojang). This research aimed to evaluate the impact of geothermal steam on microclimate conditions and Arabica coffee production. Observations of air temperature, humidity, and sunlight intensity were conducted at five locations with varying distances from the geothermal center, namely Location 1 (0–250 m), Location 2 (250–500 m), Location 3 (500–750 m), Location 4 (750–1,000 m), and Location 5 as the control site (approximately 3 km away), all with similar land characteristics. The results indicated that geothermal steam significantly alters the microclimate by decreasing air temperature by 8.8%, 8.3%, 6.9% and 1.8%, reducing sunlight intensity by 62%, 50%, 36% and 19%, as well as increasing air humidity by 11%, 5%, 4%, and 1% at Locations 1–4, respectively, compared to the control. These microclimate conditions negatively impact Arabica coffee production, reducing yields by 33%, 19% and 13% at Locations 1, 2, and 3, respectively, within a radius of less than 750 m from the geothermal center. The reduced sunlight intensity leads to lower air temperatures, increasing relative humidity, which slows coffee plant growth and elevates the risk of disease incidence.
Kata Kunci: Intensitas cahaya matahari, Kelembapan udara, Produksi kopi, Suhu udara, Uap panas bumi	Kopi Arabika adalah komoditas ekspor perkebunan yang berperan penting bagi perekonomian Indonesia. Namun, produksi kopi arabika ini masih tergolong rendah yaitu 800 kg/ha. Salah satu sentra kopi Arabika di Jawa Barat berada pada daerah aktivitas geothermal Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak uap dari aktivitas geothermal terhadap iklim mikro dan produksi kopi Arabika. Penelitian dilakukan dengan pengamatan parameter iklim yaitu suhu udara, kelembapan udara, dan intensitas cahaya matahari pada lima lokasi berdasarkan jarak berbeda dari pusat geothermal PLTP Kamojang yaitu Lokasi 1 (0-250 m), Lokasi 2 (250-500 m), Lokasi 3 (500-750 m), Lokasi 4 (750-1.000 m) dan Lokasi 5 sebagai lokasi kontrol (kira-kira berjarak 3 km) yang memiliki karakteristik lahan yang sama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa uap panas bumi berpengaruh terhadap kondisi iklim mikro yaitu menurunkan suhu udara sebesar 8,8, 8,3, 6,9 dan 1,8% dibandingkan kontrol, menurunkan intensitas

cahaya matahari sebesar 62, 50, 36 dan 19% dibandingkan kontrol serta menaikkan kelembapan udara sebesar 11, 5, 4 dan 1% dibandingkan kontrol untuk masing-masing Lokasi 1-4. Kondisi iklim mikro tersebut berpengaruh terhadap penurunan produksi kopi Arabika (kg/ha) pada Lokasi 1, 2 dan 3 masing-masing sebesar 33, 19 dan 13% dengan radius kurang dari 750 m dari pusat geothermal PLTP Kamojang. Berkurangnya intensitas matahari berdampak pada penurunan suhu udara, dan pada gilirannya kelembapan relatif meningkat. Suhu yang lebih rendah dapat memperlambat pertumbuhan tanaman kopi. Kelembapan yang tinggi juga dapat meningkatkan risiko kejadian penyakit pada tanaman kopi.

PENDAHULUAN

Kopi adalah salah satu komoditas perkebunan yang memegang peranan penting bagi perekonomian Indonesia. Pengembangan produksi kopi menjadi salah satu prioritas pembangunan di sektor pertanian, subsektor perkebunan. Salah satu jenis kopi yang banyak dibudidayakan di Indonesia adalah jenis kopi Arabika (ICO, 2019). Produksi kopi Arabika di Indonesia masih tergolong rendah yaitu sekitar 800 kg/ha biji kopi kering (BPS, 2021). Salah satu faktor penyebabnya adalah perubahan iklim (Sarvina dkk., 2020).

Salah satu sentra pengembangan produksi kopi Arabika di Jawa Barat berada di Kamojang Desa Laksana, Kecamatan Ibum, Kabupaten Bandung (BPS Kabupaten Bandung, 2023). Dari hasil wawancara dengan petani kopi di lokasi penelitian, produksi kopi mencapai angka 23.660-27.105 kg, dari total area kebun kopi arabika 65 hektar (produktivitasnya 364-417 kg/ha). Produktivitas ini tergolong rendah jika dibandingkan dengan produktivitas kopi nasional sebesar 816,35 kg/ha (Sarvina dkk., 2020). Produksi kopi Kamojang terlalu kecil untuk dibandingkan dengan produksi kopi nasional sebesar 215.327 ton. Secara topografis Kamojang termasuk wilayah dataran tinggi dengan ketinggian 1.500 meter di atas permukaan laut (MDPL). Beriklim sejuk dengan suhu 15-20°C dan curah hujan 2.500-2.885 mm/tahun. Kondisi ideal iklim mikro untuk tanaman kopi Arabika yaitu suhu udara 15-25°C, kelembapan udara 70-89%, ketinggian tempat 1.000-2.000 MDPL serta curah hujan 1.250-2.500 mm/tahun (Balittri, 2017). Sebagian besar perkebunan kopi berada di bawah pengelolaan Resort Pengelolaan Hutan (RPH) Mandalawangi, Bagian Pengelolaan Kesatuan Hutan (BKPH) Ciparay, Kesatuan Pengelolaan Hutan (KPH) Bandung Selatan Perum Perhutani Unit 3 Jabar Banten, dan Kelompok Tani Wanoja. Lokasi perkebunan kopi ini berada di Gunung Kamojang

tempat eksplorasi uap panas bumi yang dimanfaatkan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).

Kesesuaian tanah dan iklim yang menunjang pertumbuhan dan peningkatan produksi kopi diperlukan dalam menjadikan suatu kawasan potensial bagi pertanaman kopi. Aktivitas geothermal untuk PLTP menimbulkan pelepasan uap panas ke atmosfer dan lingkungan yang memengaruhi perbedaan kondisi iklim mikro. Iklim mikro tanaman adalah kondisi di sekitar tanaman mulai dari perakaran terdalam hingga tajuk teratas tanaman (Prakoswo *et al.*, 2018). Wilayah Kamojang sebagai kawasan geothermal dijustifikasi menyebabkan suhu permukaan yang lebih tinggi pada area manifestasi panas bumi (Cahyono dkk., 2019). Namun, suhu udara tidak selalu tinggi karena dipengaruhi juga oleh pergerakan uap atau massa air di udara yang menyebabkan suhu rendah dan kelembapan tinggi (Winarno dkk., 2010).

Pengembangan produksi kopi Arabika di wilayah geothermal menjadi tantangan tersendiri karena memiliki faktor-faktor pembatas berupa karakteristik lahan dan kondisi iklim mikro yang dipengaruhi adanya pengeboran sumur energi panas bumi dan uap yang dihasilkan dari aktivitas pembangkit listrik tenaga panas bumi yang menyebabkan terjadinya hujan lokal dan memengaruhi perbedaan kondisi iklim mikro. Produksi kopi Kamojang yang kini masih tergolong rendah akan diupayakan meningkat seiring dengan program Corporate Social Responsibility (CSR) yang dicanangkan PT Indonesia Power yang terintegrasi dalam bentuk pemberdayaan petani kopi di sekitar area operasional perusahaan. Namun, untuk mendukung program tersebut diperlukan kajian terlebih dahulu apakah lahan yang akan ditanami memiliki potensi yang baik untuk mengembangkan produksi kopi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak uap panas bumi dari aktivitas

geothermal PLTP Kamojang terhadap iklim mikro dan produksi kopi Arabika.

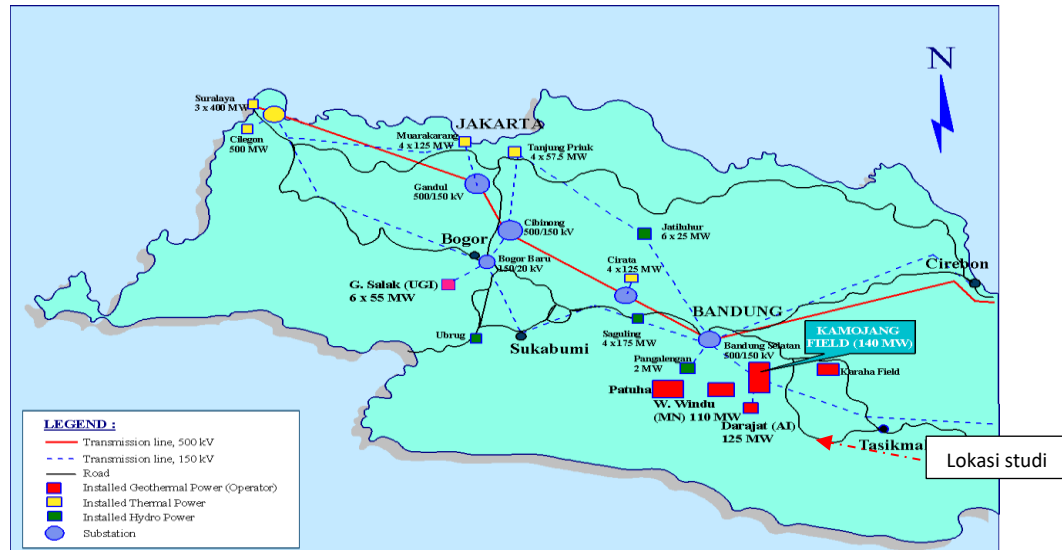
BAHAN DAN METODE

Wilayah Kajian

Penelitian dilakukan pada bulan April sampai Juni 2023. Lokasi penelitian yaitu di perkebunan kopi Arabika yang berada di wilayah geothermal Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang PT Indonesia Power (PT IP) dan PT Pertamina Geothermal Energy (PT PGE) yang secara administratif berada di Desa Laksana Kecamatan Ibun Kabupaten Bandung, Jawa Barat. Seluruh kegiatan dilakukan menggunakan metode survei deskriptif kuantitatif dan komparatif. Parameter yang diamati adalah kondisi iklim mikro (suhu udara, kelembapan udara dan intensitas cahaya matahari) serta produksi kopi Arabika.

Penentuan titik sampel pengambilan data dilakukan secara *purposive sampling*, yaitu dengan memilih secara cermat dan selektif pada objek penelitian dengan karakteristik lahan yang sama berdasarkan lokasi perkebunan terdekat hingga

terjauh dengan pusat aktivitas geothermal PLTP Kamojang, lokasi terjauh sebagai lokasi kontrol (Gambar 1). Ada lima lokasi pengamatan yang diambil berdasarkan perbedaan jarak dengan pusat geothermal PLTP Kamojang yang dijadikan sumber uap yaitu Lokasi 1 (0-250 m), Lokasi 2 (250-500 m), Lokasi 3 (500-750 m), Lokasi 4 (750-1.000 m) dan Lokasi 5 sebagai lokasi kontrol (± 3 km). Pengambilan data iklim mikro dilakukan pada pagi hari (07.00 WIB), siang hari (13.00 WIB) dan sore hari (16.00 WIB). Alat yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi peralatan kerja lapangan dan peralatan kerja studio. Peralatan kerja lapang utama yang digunakan adalah alat pengukur parameter iklim mikro yaitu lightmeter dan thermohygrometer digital, serta luxmeter (alat pengukur cahaya matahari). Alat-alat ini dipasang di area tanaman kopi dan menempel pada pohon pelindung. Adapun peralatan kerja studio utama yang digunakan adalah komputer yang telah dilengkapi dengan perangkat lunak ArcGIS versi 10.8, Microsoft Office Word, Microsoft Excel, Avenza Maps/Offline Maps, Google Earth dan Statistical Product and Service Solutions (SPSS) versi 29.



Gambar 1. Lokasi area Kamojang

Analisis Data Statistik

Analisis yang dilakukan adalah uji *t-test* dan uji korelasi regresi linear berganda. Analisis dilakukan dengan menggunakan SPSS versi 29. Uji *t-test* dilakukan untuk mengetahui pengaruh uap terhadap perbedaan kondisi iklim mikro dan produksi kopi antar lokasi pengamatan dengan lokasi kontrol yang diuji pada taraf nyata 5% uji t. Rumus uji-t adalah sebagai berikut:

$$t = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} - 2r \left(\frac{S_1}{\sqrt{n_1}} \right) \left(\frac{S_2}{\sqrt{n_2}} \right)}}$$

Keterangan:

X_1 = rata-rata sampel 1

X_2 = rata-rata sampel 2

n_1 = jumlah sampel 1

n_2 = jumlah sampel 2

S_1 = simpangan baku sampel 1

S_2 = simpangan baku sampel 2

Uji korelasi regresi berganda dilakukan untuk mengetahui pengaruh kondisi iklim mikro terhadap produksi kopi Arabika, dengan mengetahui ada tidaknya hubungan antara parameter iklim mikro dan produksi kopi Arabika. Analisis regresi linear berganda digunakan untuk mengetahui nilai pengaruh variabel (positif atau negatif) terhadap produksi kopi dengan persamaan:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

Keterangan:

Y = Produksi kopi Arabika (kg/ha)

X = (Suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya matahari)

a = Nilai Konstanta

b = Koefisien regresi

HASIL DAN PEMBAHASAN

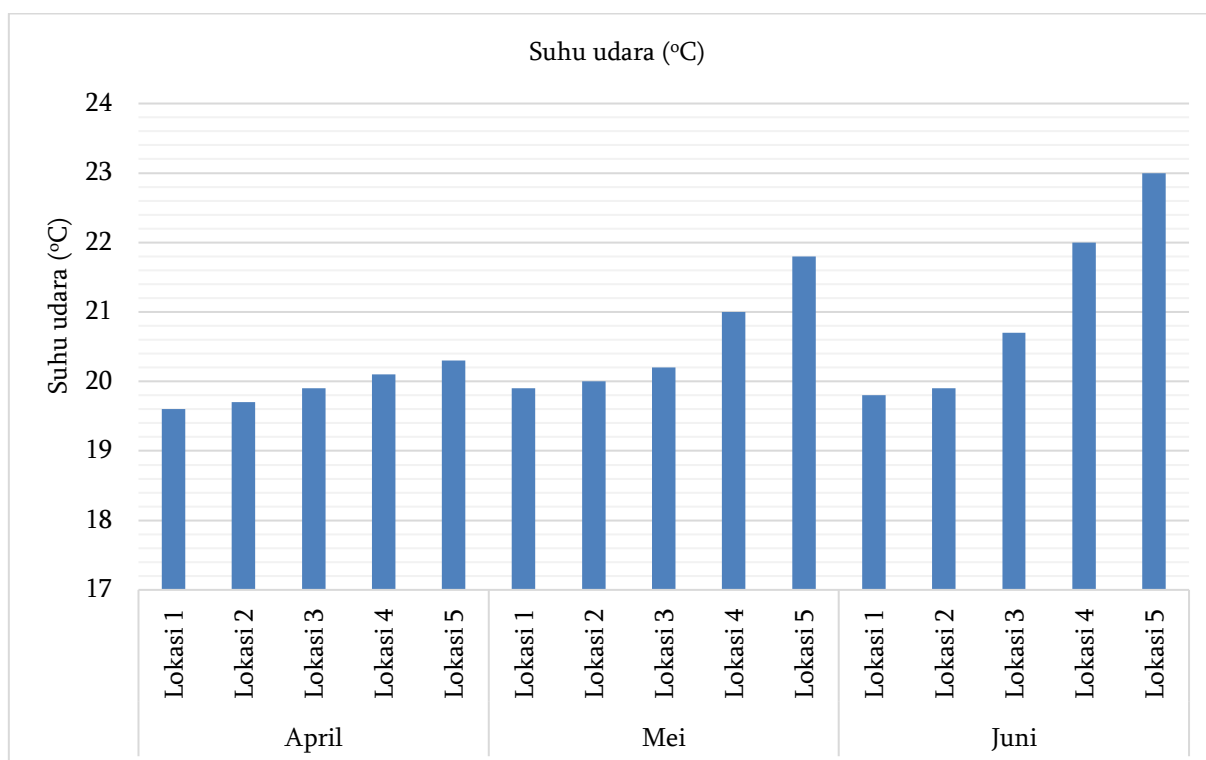
Suhu Udara

Suhu udara cepat berubah sesuai dengan tempat dan waktu tertentu. Pada umumnya suhu udara minimum terjadi pukul 07.00 WIB saat matahari terbit sedangkan suhu udara maksimum terjadi pukul 12.00 WIB sampai 14.00 WIB. Suhu rata-rata per bulan berdasarkan pengamatan lapangan di setiap lokasi penelitian dari bulan April sampai Juni mengalami perubahan yang tidak terlalu ekstrem. Suhu udara pada berbagai lokasi pengamatan (Gambar 2), diketahui semakin dekat jarak lokasi perkebunan kopi dengan pusat geothermal, kondisi suhu semakin rendah. Hal ini disebabkan oleh intensitas cahaya matahari yang berkurang. Sebaliknya, kondisi suhu semakin tinggi seiring bertambahnya jarak lokasi kebun dengan pusat geothermal, Lokasi 1 dengan suhu rata-rata 19,8°C lebih kecil dibandingkan lokasi kontrol (Lokasi 5, jarak > 1 km dari pusat aktivitas geotermal) dengan suhu rata-rata 21,7°C. Hal ini disebabkan oleh uap yang keluar dari pabrik tertahan atau terhalang oleh vegetasi hutan dan tanaman kopi, yang menyebabkan akumulasi uap air di udara dan meningkatkan kelembapan udara di pusat geotermal, sehingga suhu udara menurun. Kisaran suhu udara optimal untuk pertumbuhan tanaman kopi adalah 15-25°C. Hiwot (2011) menyatakan bahwa suhu sangat memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman kopi sehingga menjadi salah satu faktor iklim yang sangat penting. Suhu udara optimal untuk pertumbuhan kopi Arabika adalah 18-21°C dan untuk proses fotosintesisnya adalah 18-24°C (Ehrenbergerová *et al.*, 2017).

Suhu yang tinggi menyebabkan keguguran bunga sehingga pembentukan buah akan berkurang, pertumbuhan lambat, tanaman kerdil dan produksi menjadi tidak optimal (Puslitkoka, 2014). Suhu udara dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman kopi. Silva *et al.* (2004) menyatakan bahwa suhu dapat membatasi pertumbuhan dari tanaman kopi karena pertumbuhan kopi sangat dipengaruhi dengan suhu rendah dan tinggi. Suhu di atas 23°C dapat mempercepat pematangan buah dan suhu lebih tinggi dari 30°C dapat membuat pertumbuhan tanaman terhambat. Demikian juga, suhu udara yang menurun di bawah 15-16°C dapat menghambat pertumbuhan vegetatif tanaman kopi.

Suhu rata-rata per bulan tertinggi terjadi pada bulan Juni yaitu 19,8-23°C dan suhu rata-rata per bulan terendah yaitu 19,6-20,3°C terjadi pada bulan April. Perbedaan suhu udara salah satunya dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari yang diterima oleh tanaman. Ardhana (2012) menyebutkan bahwa faktor yang memengaruhi tinggi rendahnya suhu udara yaitu berupa faktor luar antara lain intensitas matahari, curah hujan, kecepatan angin dan kelembapan udara. Sementara itu, faktor dalam yang berpengaruh adalah faktor tanah yang meliputi struktur tanah, kadar air tanah, kandungan bahan organik, pH tanah dan warna tanah. Semakin rendah suhu, maka semakin lambat pematangan dan semakin tinggi suhu maka semakin cepat pematangan buah kopi. Masa panen kopi di Kamojang umumnya berkisar pada bulan April-Agustus (wawancara dengan petani kopi Kamojang).

Uap yang terbawa oleh angin ke udara dari cooling tower instalasi PLTP dan instalasi khusus pembuangan uap memiliki suhu yang tidak terlalu panas < 68°C karena uap sudah bercampur dengan banyak air, sehingga pengaruh panas uap tidak terasa langsung oleh lingkungan sekitarnya. Pengaruh uap terhadap suhu terasa apabila terjadi hujan lokal dan uap yang berubah menjadi gumpalan awan bergerak melewati perkebunan dan menghalangi intensitas cahaya matahari yang masuk ke kanopi tanaman. Hal ini dipertegas oleh pernyataan Prakoswo *et al.* (2018), bahwa tinggi rendahnya suhu udara salah satunya dipengaruhi oleh jumlah intensitas cahaya matahari. Adanya awan dari uap panas bumi dan hujan lokal serta didukung oleh faktor sistem agroforestri dengan naungan pohon pinus, suhu udara pada Lokasi 1 semakin menurun dan jika semakin tinggi fluktuasi suhu udara maka pertumbuhan tanaman kopi dan produksi kopi semakin menurun.



Gambar 2. Diagram suhu udara pada setiap lokasi pengamatan berdasarkan jarak dan waktu

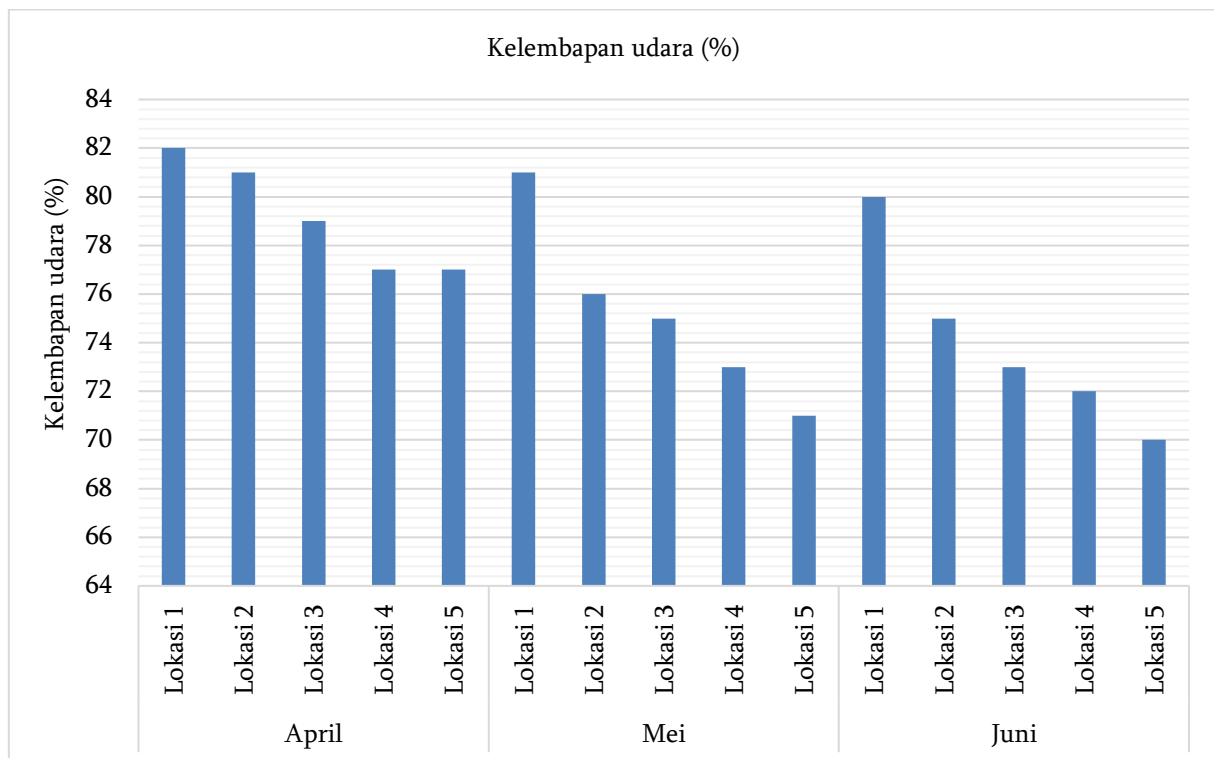
Kelembapan Udara

Kelembapan udara adalah ukuran atau konsentrasi jumlah uap air di udara. Perubahan tekanan sebagian uap air di udara berhubungan dengan perubahan suhu. Dalam proses konversi uap panas menjadi listrik ada suatu kejadian yang dinamakan *drift loss*. *Drift loss* ini merupakan kerugian massa air akibat terbawa aliran udara yang belum menguap, sehingga sebagian air pada *cooling tower* hilang ke atmosfer dan tidak ikut dalam perpindahan kalor. Hujan lokal yang terjadi di lokasi penelitian dengan jarak < 1 km terjadi akibat *drift loss* yang berlebihan pada *cooling tower*. *Cooling tower* adalah komponen pembangkit listrik yang memproses air panas menjadi air dingin agar bisa digunakan kembali dan bisa dirotasikan. Adanya hujan lokal dapat meningkatkan konsentrasi jumlah uap air di udara sehingga meningkatkan kelembapan udara.

Kelembapan udara pada berbagai lokasi pengamatan (Gambar 3), diketahui semakin dekat lokasi perkebunan kopi dengan pusat geothermal, kelembapan udara semakin tinggi, Lokasi 1 memiliki rata-rata kelembapan yang lebih tinggi yaitu 81% dibandingkan dengan lokasi kontrol dengan kelembapan rata-rata 73%. Kelembapan udara setiap

lokasi pengamatan bervariasi, pada siang hari kelembapan udara menurun hingga 25-30% pada semua lokasi pengamatan.

Kelembapan udara rata-rata tertinggi terjadi pada bulan April yaitu 80-82% dan kelembapan rata-rata terendah terjadi pada bulan Juni yaitu 70-80%. Kelembapan udara pada lokasi terdekat dengan sumber uap memiliki persentase lebih tinggi dikarenakan pengaruh adanya hujan lokal dari aktivitas geothermal. Kelembapan udara berpengaruh terhadap proses fotosintesis dan transpirasi serta pengangkutan air dan nutrisi dari akar ke tajuk tanaman (Candra, 2012). Bagian tanaman yang berhubungan dengan kelembapan udara adalah stomata pada daun di mana secara difusi terjadi pertukaran gas dan uap air di udara dan tanaman melalui stomata (Ningsih dkk., 2024). Transpirasi merupakan kandungan total air yang diuapkan ke atmosfer dari permukaan tanah dan tanaman yang dipengaruhi oleh faktor iklim mikro dan fisiologi tanaman (Farid dkk., 2023). Kelembapan udara berpengaruh langsung terhadap transpirasi yang menyebabkan terganggunya proses metabolisme tanaman dan pertumbuhan tanaman sehingga dapat menurunkan produksi tanaman.



Gambar 3. Diagram kelembapan udara pada setiap lokasi pengamatan berdasarkan jarak dan waktu

Intensitas Cahaya Matahari

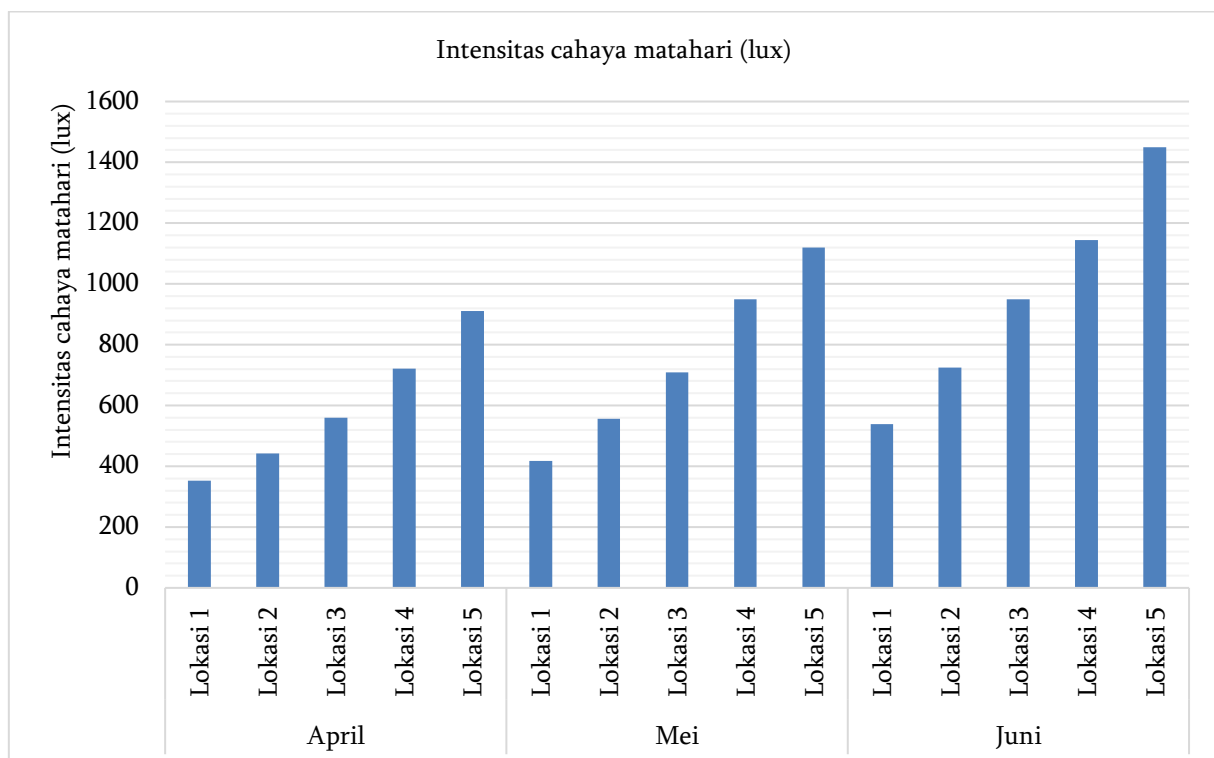
Intensitas cahaya matahari merupakan salah satu parameter yang mudah berubah-ubah dengan cepat. Intensitas cahaya matahari rata-rata per bulan berdasarkan pengamatan di setiap lokasi penelitian dari bulan April sampai Juni cukup bervariasi. Uap membubung tinggi ke atas tersebar berdasarkan arah angin, dominan bergerak satu lintasan ke arah utara melewati perkebunan kopi. Perbedaan tekanan udara di dataran tinggi melewati kanopi hutan menyebabkan uap lebih cepat terkondensasi menjadi awan dan memengaruhi intensitas cahaya yang masuk ke perkebunan kopi.

Intensitas cahaya matahari pada berbagai lokasi pengamatan (Gambar 4), diketahui semakin dekat lokasi perkebunan kopi dengan pusat geothermal, intensitas cahaya matahari semakin rendah, Lokasi 1 memiliki rata-rata intensitas cahaya matahari yaitu 436 lux ($0,64 \text{ w/m}^2$) lebih rendah dibandingkan dengan lokasi kontrol dengan rata-rata intensitas cahaya matahari yaitu 1160 lux ($1,69 \text{ w/m}^2$). Intensitas cahaya matahari rata-rata tertinggi terjadi pada bulan Juni yaitu 538-1450 lux ($0,79$ - $2,12 \text{ w/m}^2$) dan intensitas cahaya matahari rata-rata

terendah terjadi pada bulan April yaitu 352-910 lux ($0,51$ - $1,33 \text{ w/m}^2$).

Kondisi iklim mikro yang bervariasi termasuk intensitas cahaya matahari disebabkan oleh pengaruh hujan lokal di area penelitian yang dekat dengan pusat geothermal, berdasarkan pengamatan dan observasi di lapangan hujan lokal ini sering terjadi terutama di area perkebunan < 1 km dari pusat geothermal.

Intensitas cahaya matahari yang optimal untuk kopi menyebabkan laju metabolisme khususnya fotosintesis sebagai pembentuk senyawa organik semakin optimal. Penelitian Yustiningsih (2019) menunjukkan bahwa intensitas cahaya sangat berpengaruh terhadap efisiensi fotosintesis suatu tanaman. Intensitas cahaya yang terlalu rendah menyebabkan lambatnya proses pematangan buah dan mengurangi kelebihan produksi, walaupun di sisi lain dapat mengurangi kerusakan pada akar, daun dan cabang (Supriadi & Pranowo, 2015). Intensitas cahaya matahari yang terlalu tinggi atau rendah dan tidak terdistribusi secara merata dapat mengganggu proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman dalam proses pembungaan dan pembuahan.



Gambar 4. Diagram intensitas cahaya matahari setiap lokasi pengamatan berdasarkan jarak dan waktu

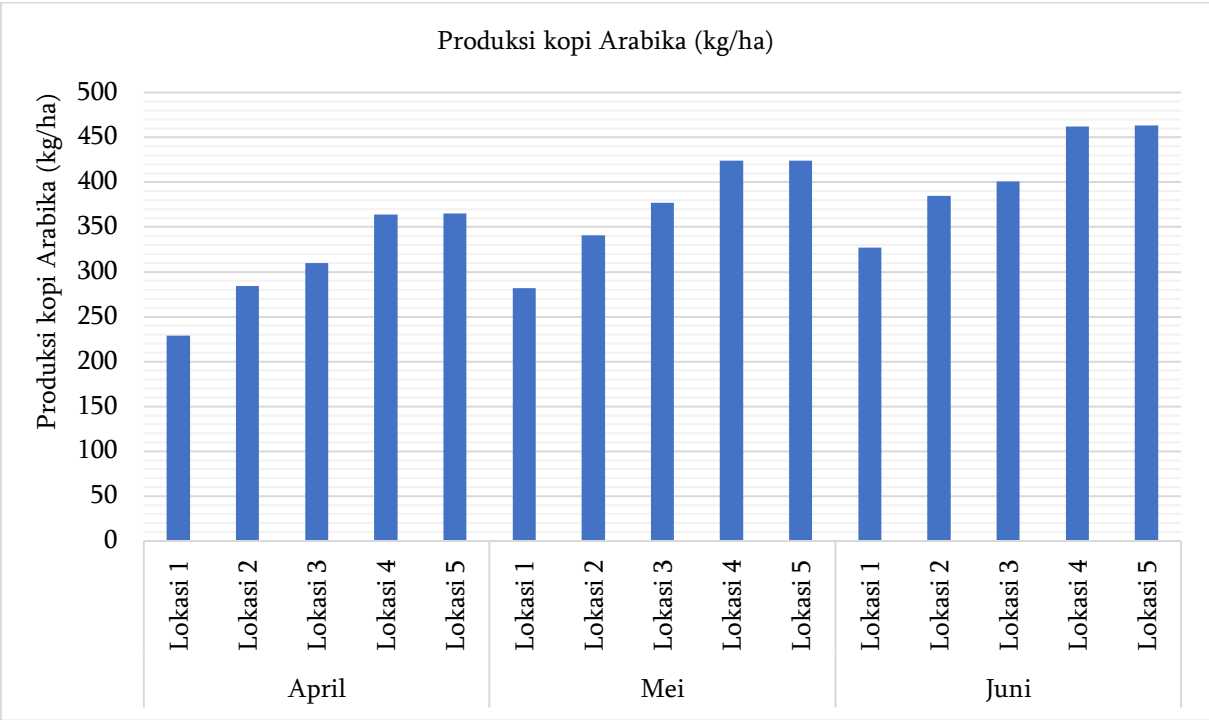
Produksi Kopi Arabika

Kopi Arabika di lokasi penelitian mulai dipanen sejak awal April. Umur rata-rata tanaman kopi Arabika di Kamojang adalah 8-10 tahun. Luas lahan perkebunan kopi Arabika yang tersebar di Kamojang sekitar 65 hektar. Nilai produksi kopi Arabika didapatkan dari hasil panen raya bulan April-Juni. Produksi kopi dihitung dari hasil panen buah kopi Arabika berbentuk ceri merah pada lahan di setiap lokasi pengamatan. Luas setiap lokasi yang diamati sekitar satu hektar dengan ketinggian 1.500 MDPL, kemiringan relatif datar dan terdapat pohon naungan. Jumlah produksi kopi di Kamojang ini merupakan produksi terbesar kedua di Kabupaten Bandung setelah Kecamatan Ciwidey (BPS Kabupaten Bandung, 2023). Kecamatan dengan produksi terbesar di Kabupaten Bandung adalah Kecamatan Ciwidey, Kecamatan Ibum (kawasan Kamojang) dan Kecamatan Kertasari dengan produksi masing-masing secara berturut-turut sebesar 934, 931, dan 754 ribu ton.

Produksi pada berbagai lokasi pengamatan (Gambar 5), diketahui cenderung menurun seiring dekatnya lokasi perkebunan dengan sumber uap. Hal ini terutama disebabkan oleh intensitas cahaya matahari yang semakin berkurang mendekati pusat aktivitas geotermal. Produksi kopi Arabika pada lokasi kontrol tidak jauh berbeda dengan produksi

pada Lokasi 4 pada rentang jarak 500-750 m, yaitu memiliki nilai rata-rata produksi yang sama sebesar 417 kg/ha. Produksi terendah terjadi pada bulan April dengan rata-rata 229-365 kg/ha, sedangkan produksi tertinggi terjadi pada bulan panen raya yaitu Mei (282-424 kg/ha) dan Juni (327-463 kg/ha). Produksi buah kopi Arabika pada Lokasi 1 memiliki produksi lebih rendah dibandingkan dengan lokasi kontrol dan mengalami penurunan seiring lebih dekatnya jarak lokasi perkebunan dengan sumber uap. Hal ini antara lain dikarenakan oleh intensitas cahaya matahari (Gambar 4) dan suhu udara yang lebih rendah (Gambar 2) disertai kelembabapan udara (Gambar 3) yang makin tinggi mendekati sumber uap.

Prastowo dkk. (2010) menyatakan bahwa faktor-faktor iklim memengaruhi pertumbuhan dan produksi kopi Arabika. Iklim mikro sangat memengaruhi produksi kopi Arabika, seperti halnya suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan gugur bunga pada tanaman kopi. Intensitas cahaya matahari yang terlalu rendah juga dapat menghambat proses fotosintesis pada daun yang mengakibatkan suplai energi untuk pertumbuhan tanaman kopi juga terhambat. Jika dilihat dari segi produksi maka Lokasi 4 lebih baik potensinya jika dibandingkan dengan Lokasi 1-3.



Gambar 5. Diagram produksi kopi arabika setiap lokasi pengamatan berdasarkan jarak dan waktu

Pengaruh Uap terhadap Perbedaan Kondisi Iklim Mikro

Uji *sampel t-test* dilakukan antar lokasi pengamatan dengan lokasi kontrol (± 3 km) meliputi Lokasi 1 (0-250 m), Lokasi 2 (250-500 m), Lokasi 3 (500-750 m) dan Lokasi 4 (750-1.000 m). Kaidah yang diambil pada hasil akhir yaitu H_0 diterima jika probabilitas Sig. (*2-tailed*) $> 0,05$ artinya tidak terdapat perbedaan yang signifikan. H_1 diterima jika probabilitas Sig. (*2-tailed*) $< 0,05$ artinya terdapat perbedaan yang signifikan di mana nilai rata-rata berbeda nyata pada taraf nyata 5% uji-t antara dua lokasi yang diuji.

Hasil pengolahan data dengan uji *t-test* (Tabel 5) menunjukkan perbedaan spesifik setiap parameter iklim mikro yang diamati beserta perbedaan produksi pada setiap lokasi. Terlihat jelas bahwa Lokasi 1-3 dan lokasi kontrol terdapat perbedaan yang signifikan dari hasil yang didapatkan. Sementara itu, untuk Lokasi 4 dengan lokasi kontrol tidak terdapat perbedaan yang signifikan dari hasil yang didapatkan. Jadi dapat dikatakan bahwa pengaruh uap terhadap perbedaan intensitas cahaya matahari hanya sampai pada Lokasi 3 atau hingga < 750 m dari sumber uap PLTP Kamojang. Hal ini berlaku juga untuk suhu, kelembapan dan produksi terpengaruh sampai Lokasi 3 atau hingga < 750 m.

Tabel 1. Hasil uji *independent sample t-test* (Lokasi 1-Lokasi Kontrol)

Statistik grup						
	Lokasi	Sampel	Rata-rata	Standar deviasi	Standar error rata-rata	Nilai signifikansi
Suhu	Lokasi 1	12	20,15	1,102	,318	,004
	Lokasi kontrol	12	21,76	1,336	,386	
Kelembapan	Lokasi 1	12	81,00	3,330	,961	<,001
	Lokasi kontrol	12	72,58	4,295	1,240	
Intensitas cahaya	Lokasi 1	12	540,42	253,643	73,220	<,001
	Lokasi kontrol	12	1228,58	417,998	120,666	
Produksi	Lokasi 1	12	279,08	43,636	12,597	<,001
	Lokasi kontrol	12	417,42	60,090	17,346	

Tabel 2. Hasil uji *independent sample t-test* (Lokasi 2-Lokasi Kontrol)

Statistik grup						
	Lokasi	Sampel	Rata-rata	Standar deviasi	Standar error rata-rata	Nilai signifikansi
Suhu	Lokasi 2	12	20,59	1,315	,379	,042
	Lokasi kontrol	12	21,76	1,336	,386	
Kelembapan	Lokasi 2	12	78,58	4,010	1,158	,027
	Lokasi kontrol	12	75,33	2,570	,742	
Intensitas cahaya	Lokasi 2	12	732,17	369,922	106,787	,020
	Lokasi kontrol	12	1115,92	382,354	110,376	
Produksi	Lokasi 2	12	336,58	46,088	13,304	,001
	Lokasi kontrol	12	417,42	60,090	17,346	

Tabel 3. Hasil uji *independent sample t-test* (Lokasi 3-Lokasi Kontrol)

Statistik grup						
	Lokasi	Sampel	Rata-rata	Standar deviasi	Standar error rata-rata	Nilai signifikansi
Suhu	Lokasi 3	12	20,62	1,061	,306	,031
	Lokasi kontrol	12	21,76	1,336	,386	
Kelembapan	Lokasi 3	12	76,83	3,881	1,120	,019
	Lokasi kontrol	12	72,58	4,295	1,240	
Intensitas cahaya	Lokasi 3	12	1029,08	298,757	86,244	,192
	Lokasi kontrol	12	1228,58	417,998	120,666	
Produksi	Lokasi 3	12	362,58	46,500	13,423	,020
	Lokasi kontrol	12	417,42	60,090	17,346	

Tabel 4. Hasil uji *independent sample t-test* (Lokasi 4-Lokasi Kontrol)

Statistik grup						
	Lokasi	Sampel	Rata-rata	Standar deviasi	Standar error rata-rata	Nilai signifikansi
Suhu	Lokasi 4	12	21,31	1,214	,350	,350
	Lokasi kontrol	12	21,80	1,308	,378	
Kelembapan	Lokasi 4	12	74,25	5,496	1,587	,808
	Lokasi kontrol	12	74,75	4,413	1,274	
Intensitas cahaya	Lokasi 4	12	1029,08	298,757	86,244	,192
	Lokasi kontrol	12	1228,58	417,998	120,666	
Produksi	Lokasi 4	12	416,33	60,489	17,462	,965
	Lokasi kontrol	12	417,42	60,090	17,346	

Tabel 5. Rekapitulasi hasil analisis uji *t-test* setiap lokasi pengamatan dengan lokasi kontrol

Lokasi pengamatan	Suhu udara (°C)	Kelembapan udara (%)	Intensitas cahaya (lux)	Produksi (kg/ha)
Lokasi 1 (0-250 m)- Lokasi kontrol	Berbeda	Berbeda	Berbeda	Berbeda
Lokasi 2 (250-500 m) - Lokasi kontrol	Berbeda	Berbeda	Berbeda	Berbeda
Lokasi 3 (500-750 m) - Lokasi kontrol	Berbeda	Berbeda	Tidak berbeda	Berbeda
Lokasi 4 (750-1.000) - Lokasi kontrol	Tidak berbeda	Tidak berbeda	Tidak berbeda	Tidak berbeda

Keterangan:

- Suhu udara lokasi pengamatan dan lokasi kontrol, berbeda signifikan hingga jarak < 750 m
- Kelembapan udara lokasi pengamatan dan lokasi kontrol, berbeda signifikan hingga jarak < 750 m
- Intensitas cahaya matahari lokasi pengamatan dan lokasi kontrol, berbeda signifikan hingga jarak < 500 m
- Produksi kopi Arabika lokasi pengamatan dan lokasi kontrol, berbeda signifikan hingga jarak < 750 m

Berdasarkan Analisis Dampak Lingkungan (ANDAL) tahun 2017, aktivitas geothermal PLTP menyebabkan dampak terhadap komponen geofisik-kimia salah satunya terhadap perbedaan kondisi iklim meliputi curah hujan, suhu dan kelembapan udara, arah dan kecepatan angin serta kualitas udara. Komposisi kimia uap panas bumi PLTP meliputi air (H₂O), karbondioksida (CO₂), belerang atau sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), oksidan (O₃), hidro karbon (HC), timah hitam (Pb), dengan konsentrasi yang rendah di bawah ambang batas. Parameter komposisi kimia uap panas bumi ke udara di PLTP Kamojang telah memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan dalam

Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara.

Pengaruh Kondisi Iklim Mikro terhadap Produksi Kopi Arabika

Uji korelasi regresi berganda dilakukan untuk mengetahui hubungan keeratan antara parameter iklim mikro dengan produksi kopi Arabika dan nilai pengaruh variabel iklim mikro terhadap produktivitas kopi Arabika. Pada analisis data ini digunakan variabel bebas di antaranya suhu udara (X₁), kelembapan udara (X₂), intensitas cahaya matahari (X₃) dan variabel terikat yaitu produksi kopi Arabika (Y). Hasil analisis pengaruh iklim mikro terhadap produksi kopi disajikan pada Tabel 6-8.

Tabel 6. Hasil uji korelasi regresi linear berganda

Model summary									
Model	R	R square	Adjusted R square	Std. error of the estimate	R square change	Change statistics			
						F	df1	df2	Sig. F change
1	,776a	,603	,582	46,929	,603	28,342	3	56	<,001

Keterangan: a = Predictors: (constant), intensitas cahaya matahari, suhu udara, kelembapan udara.

Tabel 7. Hasil uji ANOVA

ANOVA ^a						
Model		Sum of squares	df	Mean square	F	Sig.
1	Regression	187257,150	3	62419,050	28.342	<,001 ^b
	Residual	123331,250	56	2202,344		
	Total	310588,400	59			

Keterangan: a = Dependent variable: produksi kopi. b = Predictors: (constant), intensitas cahaya matahari, suhu udara, kelembapan udara.

Tabel 8. Analisis koefisien

Coefficients ^a					
Model		Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	
		B	Std. error	Beta	t
1	(Constant)	217,186	201,275		1,079
	Suhu udara	17,706	4,893	,379	3,619
	Kelembapan udara	-3,565	1,696	-,263	-2,102
	Intensitas cahaya matahari	,049	,021	,272	2,310

Keterangan:

- a = Dependent variable: produksi kopi
- Rumus t tabel = $t(\alpha/2; n-k-1) = t(0,05/2; 64-3-1) = t(0,025; 60) = 2,000$
- Rumus f tabel = $F(k; n-k) = F(3; 60) = 2,76$

Suhu udara (X₁) terhadap variabel produksi (Y), diketahui nilai Sig. untuk pengaruh X₁ terhadap Y adalah sebesar < 0,001 < 0,05 dan nilai t hitung 3,619 > t tabel 2,000 sehingga terdapat pengaruh suhu udara terhadap produktivitas kopi Arabika. Suhu berkorelasi positif dengan produksi, artinya produksi

kopi akan naik seiring dengan adanya kenaikan suhu, asalkan kenaikan tersebut tidak melebihi batas optimal. Semakin tinggi suhu udara mendekati suhu optimal, maka produksi kopi semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan Silva (2004) menyatakan bahwa suhu dapat membatasi perkembangan dari tanaman

kopi karena pertumbuhan tanaman kopi sangat dipengaruhi oleh suhu tinggi dan rendah. Jika suhu semakin meningkat akan memengaruhi pertumbuhan vegetatif tanaman kopi dan jika suhu terlalu rendah akan menurunkan kualitas dan bobot biji kopi. Suhu udara yang terlalu tinggi atau terlalu rendah akan memengaruhi mikroorganisme dan makroorganisme yang ada di tanah dan tanaman, sehingga tanaman kopi menjadi rentan terserang penyakit yang nantinya dapat menurunkan produksi.

Kelembapan udara (X_2) terhadap produksi (Y), diketahui nilai Sig. untuk pengaruh X_2 terhadap Y adalah sebesar $0,040 < 0,05$ dan nilai t hitung $2,102 > t$ tabel $2,000$ sehingga terdapat pengaruh kelembapan udara terhadap produksi kopi Arabika. Kelembapan udara berkorelasi negatif dengan produksi, artinya produksi kopi akan naik seiring dengan menurunnya kelembapan. Hal ini sesuai dengan penelitian Farid dkk. (2023) yang menyebutkan bahwa tingkat kelembapan yang terlalu tinggi ($>80\%$) dapat menyebabkan pembentukan air pada daun dan bunga, kondisi ini menyebabkan tanaman, bunga dan buahnya rentan terhadap serangan penyakit sehingga menurunkan produksi. Menurut Fanourakis *et al.* (2010) tanaman yang tumbuh pada lingkungan dengan kelembapan tinggi bisa mengalami perubahan perilaku metabolisme, termasuk pada proses transpirasi. Hal ini disebabkan adanya perubahan perilaku stomata dalam membuka dan menutup sehingga proses penyerapan air dan hara oleh akar tanaman dapat terganggu. Sementara itu, tingkat kelembapan yang rendah dengan suhu tinggi menyebabkan tanaman lebih cepat kehilangan air melalui daun dibandingkan dengan kemampuan tanaman menyerap air melalui akar, yang menyebabkan kekeringan dan layu tanaman.

Intensitas cahaya matahari (X_3) terhadap produksi (Y), diketahui nilai Sig. untuk pengaruh X_1 terhadap Y adalah sebesar $0,025 < 0,05$ dan nilai t hitung $2,310 > t$ tabel $2,000$ sehingga terdapat pengaruh intensitas cahaya terhadap produksi kopi Arabika. Intensitas cahaya berkorelasi positif dengan produksi, artinya produksi kopi akan naik seiring dengan meningkatnya intensitas cahaya matahari. Kopi merupakan tanaman C3 dengan penyinaran tidak penuh sehingga dibutuhkan naungan untuk mengontrol laju fotorespirasi agar efisiensi fotosintesis lebih maksimal, namun tetap memerlukan intensitas cahaya matahari yang optimal untuk proses fotosintesisnya. Gumpalan awan dan adanya hujan lokal di lokasi terdekat dengan sumber uap menyebabkan suhu rendah, kelembapan

meningkat dan produksi kopi semakin menurun. Hal ini sesuai dengan pernyataan Sobari dkk. (2012) bahwa intensitas cahaya yang terlalu rendah menyebabkan terhambatnya proses fotosintesis, mengurangi aliran CO_2 dalam daun sehingga proses asimilasi menjadi berkurang. Berkurangnya hasil fotosintesis dapat mengurangi pertumbuhan dan perkembangan tanaman kopi termasuk pembentukan buah serta meningkatkan serangan penyakit karat daun (*Hemileia vastatrix*). Sementara itu, intensitas cahaya matahari yang tinggi dapat menyebabkan kehilangan energi yang lebih besar dibandingkan energi yang terpakai untuk proses fotosintesis.

Nilai signifikansi untuk pengaruh X_1 (suhu udara), X_2 (kelembapan udara), X_3 (intensitas cahaya matahari) secara simultan terhadap Y adalah sebesar $< 0,001 < 0,05$ dan nilai F hitung $28,342 > F$ tabel $2,76$ sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat pengaruh variabel iklim mikro secara simultan terhadap produksi kopi Arabika. Berdasarkan hasil pada Tabel 8 dapat disusun persamaan regresi linear berganda, yaitu:

$$Y = 217,186 + 17,706 X_1 - 3,565 X_2 + 0,049 X_3$$

Keterangan:

Y = Produksi kopi Arabika (kg/ha)

X_1 = Suhu udara ($^{\circ}C$)

X_2 = Kelembapan udara (%)

X_3 = Intensitas cahaya matahari (lux)

Persentase pengaruh diketahui dari nilai R^2 sebesar $0,603$ artinya pengaruh iklim mikro terhadap produksi kopi Arabika adalah sebesar $60,3\%$ termasuk ke dalam kategori pengaruh yang sedang. Sisa persentase $39,7\%$ merupakan faktor lain yang dapat memengaruhi di antaranya faktor lingkungan yang belum teridentifikasi seperti faktor pengelolaan tanah, fisiologis dan genetik tanaman, pemberian pupuk, pengendalian hama dan penyakit tanaman, jenis pohon naungan, jarak tanam spesifik manajemen budidaya kopi dan lain-lain.

SIMPULAN

Ekspansi uap panas bumi yang dihasilkan dari aktivitas geothermal PLTP Kamojang berdampak terhadap perbedaan kondisi iklim mikro hingga radius < 1 km. Parameter suhu udara yang terpengaruh yaitu pada Lokasi 1-3 (radius < 750 m). Kelembapan udara terpengaruh yaitu pada Lokasi 1-3 (radius < 750 m). Intensitas cahaya matahari terpengaruh yaitu pada Lokasi 1 dan 2 (radius < 500

m). Kondisi iklim mikro di wilayah geothermal Kamojang berpengaruh terhadap penurunan produksi kopi Arabika. Produsen kopi di seluruh dunia memahami pentingnya iklim mikro dan secara cermat memilih lokasi perkebunan mereka untuk mengoptimalkan kondisi ini. Perhatian terhadap detail iklim mikro pada akhirnya menghasilkan biji kopi yang memikat para penikmat kopi dengan citarasanya yang unik dan kompleks, menjadikan kopi Arabika sebagai perwujudan sejati hubungan simbiosis antara alam dan pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

- [ANDAL] Analisis Dampak Lingkungan Hidup. 2017. Rencana Kegiatan Pengusahaan Panas Bumi untuk PLTP Rantau Dedap 250 MW di Kabupaten Muara Enim, Kabupaten Lahat, dan Kota Pagar Alam, Provinsi Sumatera Selatan. PT Supreme Energy Rantau Dedap. Hlm. 345-367. Tersedia online pada https://www.nexi.go.jp/environment/info/pdf/ins_kankyuu_17-011_01.pdf (diakses 3 Oktober 2023)
- Ardhana, IPG. 2012. Ekologi Tumbuhan. Udayana University Press. Denpasar.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2021. Statistik Kopi Indonesia 2020. Tersedia online pada <https://www.bps.go.id/publication/2021/11/30/b1b6cf2a6aad1ee2d8a4c656/statistik-kopi-indonesia-2020.html> (diakses 3 September 2023)
- [BPS Kabupaten Bandung] Badan Pusat Statistik Kabupaten Bandung. 2023. Luas Areal Tanaman Perkebunan Kopi Menurut Kecamatan di Kabupaten Bandung (Hektar), 2019-2022. Tersedia online pada <https://bandungkab.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTg1IzI=/luas-areal-tanaman-perkebunan-kopi-menurut-kecamatan-di-kabupaten-bandung.html> (diakses 7 September 2023)
- [Balittri] Balai Penelitian Tanaman Industri dan Penyegar. 2017. Persiapan dan Kesesuaian Lahan Tanaman Kopi. Tersedia online pada <http://balittri.litbang.pertanian.go.id> (diakses 3 September 2023)
- Cahyono, BE, N Jannah, dan A Suprianto. 2019. Analisis sebaran potensi dan manifestasi panas bumi pegunungan Ijen berdasarkan suhu permukaan dan geomorfologi. *Natural B-Journal of Health and Environmental Sciences*. 5(1): 19–27.
- Candra, A. 2012. Distribusi moisture content pada zona perakaran tanaman (zona tidak jenuh) perkebunan teh Gambung Bandung Selatan. *Dinamika Rekayasa*. 8(1): 12–17. DOI: 10.20884/1.dr.2012.8.1.53.
- Ehrenbergerová, L, M Šenfěldr, and H Habrová. 2017. Impact of tree shading on the microclimate of a coffee plantation: A case study from the Peruvian Amazon. *Bois et Forêts Des Tropiques*. 334(4): 13–22. DOI: 10.19182/bft2017.334.a31488.
- Fanourakis, D, N Matkaris, E Heuvelink, and SMP Carvalho. 2010. Effect of relative air humidity on the stomatal functionality in fully developed leaves. *Acta Horticulturae*. 870(2): 83–88. DOI: 10.17660/ActaHortic.2010.870.8.
- Farid, N, A Sarjito, dan Z Ulinniha. 2023. Pengaruh kelembaban terhadap pertumbuhan dan transpirasi lima varietas anggrek *Dendrobium*. *Agromix*. 14(1): 96–103. DOI: 10.35891/agx.v14i1.3014.
- Hiwot, H. 2011. Growth and Physiological Response of Two *Coffea arabica* L. Population Under High and Low Irradiance. [Thesis]. Addis Ababa University. Addis Ababa.
- [ICO] International Coffee Organisation. 2019. World Coffee Consumption for 2019/2020. Available online at <http://www.ico.org/new-consumption-table.pdf> (accessed 25 January 2022)
- Ningsih, MS, E Susilo, Rahmadina, FH Qolby, DD Tanjung, U Anis, E Susila, NH Panggabean, S Priyadi, J Nasution, NY Sari, R Baharuddin, dan MP Wisnubroto. 2024. Dasar-dasar Fisiologi Tumbuhan. CV Hei Publishing Indonesia. Padang.
- Prakoswo, D, Ariffin, and SY Tyasmoro. 2018. The analyze of agroclimate in UB forest area Malang District, East Java, Indonesia. *Bioscience Research*. 15(2): 918–923.
- Prastowo, B, E Karmawati, R Siswanto, C Indrawanto, dan SJ Munarso. 2010. Budidaya dan Pascapanen Kopi. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan. Bogor.
- [Puslitkoka] Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia. 2014. Pedoman Teknis Budi Daya Tanaman Kopi. Puslit Kopi & Kakao. Jember.
- Sarvina, Y, T June, E Surmaini, R Nurmalinga, dan SS Hadi. 2020. Strategi peningkatan produktivitas kopi serta adaptasi terhadap variabilitas dan

- perubahan iklim melalui kalender budidaya. Jurnal Sumberdaya Lahan. 14(2): 65–78. DOI: 10.21082/jsdl.v14n2.2020.65-78.
- Silva, EA, FM DaMatta, C Ducatti, AJ Regazzi, and RS Barros. 2004. Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. Field Crops Research. 89(1): 349–357. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.02.010.
- Sobari, I, Sakiroh, dan HP Eko. 2012. Pengaruh jenis tanaman penayang terhadap pertumbuhan dan persentase tanaman berbuah pada kopi Arabika Varietas Kartika 1. Journal of Industrial and Beverage Crops. 3(3): 217-222. DOI: 10.21082/jtidp.v3n3.2012.p217-222.
- Supriadi, H, dan B Pranowo. 2015. Prospek pengembangan agroforestri berbasis kopi di Indonesia. Jurnal Perspektif. 14(2): 135-150. DOI: 10.21082/p.v14n2.2015.135-150.
- Winarno, GD, Hatma, dan SA Soedjoko. 2010. Hidrologi Hutan. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Yustiningsih, M. 2019. Intensitas cahaya dan efisiensi fotosintesis pada tanaman naungan dan tanaman terpapar cahaya langsung. Bio-Edu. 4(2): 44-49. DOI: 10.32938/jbe.v4i2.385.