

Tinjauan Pustaka: Pendekatan Penginderaan Jauh dalam Analisis Dampak Perubahan Iklim terhadap Produktivitas Kopi

Ika Purnamasari^{a,b*}

^aDepartemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 60111, Indonesia

^bProdi Agroteknologi, Universitas Jember, Jember, 68121, Indonesia

*Korespondensi Penulis: ikapurnamasari@unej.ac.id



Dikirim: 5 September 2025;
Diterima: 9 September 2025;
Diterbitkan: 9 September 2025.

Abstrak. Perubahan iklim global memberikan tantangan yang signifikan terhadap sektor pertanian kopi yang sangat bergantung pada kondisi iklim dan ketersediaan lahan. Penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) menjadi alat krusial dalam memadukan dinamika vegetasi, kesesuaian lahan, serta produktivitas kopi secara spasial dan temporal. Tinjauan literatur ini mensintesis temuan dari publikasi internasional terkini terkait penggunaan teknologi penginderaan jauh, indeks vegetasi, dan metode mesin pembelajaran untuk menganalisis dampak perubahan iklim terhadap produktivitas kopi. Metode bibliometrik dengan VOSviewer digunakan untuk menganalisis pola penelitian dan perkembangan bidang ini. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa integrasi data multisensor, pengindeksan vegetasi (seperti NDVI, EVI, SAVI), serta teknologi drone mendukung peningkatan akurasi pemantauan dan prediksi hasil kopi. Namun, terdapat kesenjangan terkait data resolusi spasial dan temporal, model prediksi yang terpadu, dan jaranganya studi yang menghubungkan kondisi iklim, penggunaan lahan, dan produktivitas kopi secara komprehensif. Implikasi kajian ini penting bagi pengembangan teknologi adaptasi pertanian kopi yang berkelanjutan dan berbasis bukti ilmiah. Tinjauan ini memberikan referensi bagi peneliti dan pembuat kebijakan dalam merancang strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim pada sektor kopi.

Kata kunci: Indeks Vegetasi, Kesesuaian Iklim, Penginderaan Jauh, Penggunaan Lahan, Produktivitas Kopi

Remote Sensing Approach in Analyzing the Impact of Climate Change on Coffee Productivity: Literature Review

Abstract. Global climate change poses a significant challenge to the coffee agriculture sector, which heavily relies on climatic conditions and land availability. Remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) have become crucial tools in integrating vegetation dynamics, land suitability, and coffee productivity spatially and temporally. This literature review synthesizes findings from recent international publications on the use of remote sensing technology, vegetation indices, and machine learning methods to analyze the impact of climate change on coffee productivity. A bibliometric approach using VOSviewer was employed to analyze research trends and developments in this field. The results indicate that the integration of multisensor data, vegetation indices (such as NDVI, EVI, SAVI), and drone technology supports improved accuracy in monitoring and predicting coffee yields. However, gaps exist regarding spatial and temporal resolution data, integrated prediction models, and the scarcity of studies comprehensively linking climate conditions, land use, and coffee productivity. The implications of this study are important for developing sustainable and evidence-based adaptation technologies for coffee agriculture. This review provides a reference for researchers and policymakers in designing climate change mitigation and adaptation strategies for the coffee sector.

Keywords: Climate Suitability, Coffee Productivity, Land Use, Remote Sensing, Vegetation Indices

I. PENDAHULUAN

Kopi merupakan salah satu komoditas perkebunan utama yang memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian serta kesejahteraan petani di berbagai negara tropis. Namun, sektor perkebunan kopi saat ini menghadapi tantangan besar akibat perubahan iklim global yang menyebabkan perubahan suhu, pola curah hujan, dan dinamika ekosistem yang berdampak langsung pada produktivitas dan budidaya kopi [1][2]. Perubahan penggunaan lahan mengakibatkan berkurangnya lahan yang sesuai untuk budidaya kopi, sehingga perlu dilakukan analisis pemetaan dan kesesuaian lahan secara tepat untuk mendukung pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan [3][4].

Teknologi penginderaan jauh (penginderaan jauh) dan Sistem Informasi Geografis (SIG) telah menjadi alat yang sangat penting dalam pemantauan vegetasi, evaluasi kondisi lahan, serta prediksi produktivitas tanaman secara spasial dan temporal [5][6]. Kemampuan dalam menyediakan data multispektral dan multitemporal, penginderaan jauh memfasilitasi analisis indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) yang berperan sebagai indikator kunci dalam menilai kesehatan tanaman serta ketersediaan lahan untuk pertanian kopi [7][8].

Secara ilmiah, kajian mengenai hubungan antara kondisi iklim, penggunaan lahan, dan produktivitas kopi melalui pendekatan penginderaan jauh terus berkembang, mengintegrasikan algoritma pembelajaran mesin dan model prediktif untuk meningkatkan akurasi estimasi kesesuaian dan produksi tanaman [9][10]. Penelitian ini juga relevan untuk memahami dampak perubahan iklim jangka panjang terhadap persebaran dan adaptasi kopi di berbagai wilayah geografis [11][12].

Secara praktis, hasil kajian ini sangat berguna sebagai dasar pengambilan kebijakan agronomi dan tata guna lahan oleh pemerintah dan petani, membantu perencanaan penggunaan lahan yang optimal, mitigasi risiko kegagalan panen akibat cuaca ekstrem, serta pemanfaatan sumber daya alam yang efisien dan berkelanjutan [3]. Selain itu, penggunaan teknologi sensor berbasis drona dan pengolahan citra multispektral menjadi alternatif unggul dalam pemantauan kondisi tanaman secara *real-time* dan spesifik lokasi [8][13].

Berbagai penelitian telah mengembangkan dan mengimplementasikan metode-metode terkini dalam kesesuaian lahan kopi dan pemantauan kesehatan tanaman menggunakan kombinasi data satelit seperti Lsat, Sentinel, MODIS, serta data drone [1][10][14]. Indeks vegetasi seperti NDVI, EVI, SAVI, dan indeks baru yang dikembangkan khusus untuk kopi telah digunakan secara luas untuk mengkorelasikan kondisi vegetasi dengan

potensi produktivitas dan kejadian stres abiotik seperti kekeringan dan embun beku [15][8] [16].

Selain penginderaan jauh, pendekatan berbasis GIS dan evaluasi multi-kriteria (misal *Analytic Hierarchy Process*) juga banyak diadopsi untuk kesesuaian lahan, menggabungkan faktor topografi, kualitas tanah, iklim, dan tekanan antropogenik guna menghasilkan peta komprehensif dan aplikatif [3][17]. Metode *machine learning* dan data fusion semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan klasifikasi lahan dan prediksi hasil panen, memberikan hasil yang lebih presisi dan adaptif terhadap kondisi lokal [10][18].

Tujuan utama kajian pustaka ini adalah untuk mengulas dan mensintesis perkembangan terbaru tentang penggunaan teknologi penginderaan jauh, indeks vegetasi, dan SIG dalam kesesuaian lahan dan prediksi produktivitas kopi, serta mengidentifikasi celah penelitian dan aplikasi yang berpotensi untuk mendukung resistensi sektor kopi di tengah perubahan iklim dan transformasi penggunaan lahan. Signifikansi kajian ini terletak pada pemberian pemahaman mendalam mengenai keunggulan, kendala, dan peluang integrasi teknologi penginderaan jauh dengan model spasial dan pembelajaran mesin dalam mendukung praktik pertanian kopi yang adaptif dan berkelanjutan. Kajian ini juga bertujuan menjadi referensi bagi peneliti, praktisi pertanian, dan pembuat kebijakan dalam merancang strategi pengelolaan sumber daya lahan dan mitigasi dampak iklim yang efektif.

II. METODOLOGI

2.1 Sumber Data dan Perangkat yang Digunakan

Kajian pustaka pada artikel ini menggunakan artikel bereputasi internasional dari basis data Google Scholar. Artikel ilmiah dikumpulkan pada 3 September 2025 menggunakan perangkat lunak Harzing's Publish Perish yang dapat diakses secara terbuka pada website Harzing.com. Kata kunci *Remote Sensing*, *Coffee Productivity*, *Vegetation Indices*, *Land Use*, *Climate Suitability* digunakan sehingga terhimpun 200 bibliografi pada rentang tahun 2016-2025 berisi sitasi, rangkai, nama penulis, judul, tahun terbit, nama jurnal dan nama publisher. Data bibliografi selanjutnya disimpan dalam bentuk file RIS/RefManager untuk dianalisis menggunakan aplikasi VOSviewer versi 1.6.20. VOSviewer berperan dalam memetakan jaringan hubungan antara publikasi, penulis, institusi, maupun kata kunci yang sering muncul dalam literatur, melalui analisis data sitasi, co-citation, dan co-occurrence kata kunci. Visualisasi grafis yang dihasilkan membantu mengidentifikasi tren penelitian, pola kolaborasi antar penulis atau institusi, dan tema-tema sentral dalam bidang kajian, sekaligus menunjukkan evolusi atau perkembangan ilmiah secara sistematis [19].

2.2 Analisis Kajian Bibliometrik

Analisis review yang digunakan dengan VOSviewer untuk menggambarkan perkembangan penelitian dengan topik *Remote Sensing, Coffee Productivity, Vegetation Indices, Land Use, Climate Suitability* adalah analisis *Network Visualization, Overlay Visualization* dan *Density Visualization*.

1. *Network Visualization* berfungsi memetakan jaringan hubungan antara elemen seperti penulis, institusi, atau kata kunci berdasarkan koneksi situs atau kolaborasi. Visualisasi ini membantu mengidentifikasi kelompok tematik dan hubungan antar komponen dalam bidang kajian [19].
2. *Overlay Visualization* menambahkan dimensi tambahan waktu pada jaringan yang telah dipetakan dengan menai node menggunakan warna gradien sehingga memudahkan dalam mengamati tren perkembangan penelitian dan topik yang sedang menjadi fokus penelitian terbaru [20].
3. *Density Visualization* menunjukkan konsentrasi dan kepadatan elemen penelitian dalam bentuk peta warna, area dengan warna lebih cerah menunjukkan fokus penelitian yang lebih tinggi. Visualisasi ini mempermudah identifikasi area yang paling aktif dan potensi gap riset [21].

III. TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Pemahaman dan Konsep Dasar Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh memungkinkan pengamatan dan pengukuran objek atau fenomena permukaan bumi tanpa kontak langsung, menggunakan sensor yang terpasang pada satelit atau pesawat terbang. Prinsip dasar penginderaan jauh melibatkan pengukuran radiasi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan dari permukaan bumi, yang kemudian diolah menjadi citra digital dan data spasial yang dapat dianalisis untuk berbagai aplikasi kondisi lingkungan dan sumber daya alam [22]. Indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Enhanced Vegetation Index* (EVI) menjadi alat analitik yang sangat penting dalam penginderaan jauh, digunakan untuk menilai kondisi vegetasi dan perubahan tutupan lahan secara cepat dan efisien [23][24]. Teknologi penginderaan jauh juga sangat didukung oleh perkembangan sistem informasi geografis (GIS) yang memungkinkan integrasi data spasial dan analisis multidimensi [25].

3.2 Aplikasi Penginderaan Jauh dalam Pertanian

Penginderaan jauh telah berkembang menjadi alat penting dalam presisi pertanian dengan penerapan yang luas mulai dari klasifikasi tutupan lahan, penilaian

kesehatan tanaman, prediksi hasil panen, hingga pengelolaan irigasi [26][27]. Data satelit multispektral memungkinkan pemantauan spasial dan temporal terhadap vegetasi agrikultur melalui indeks vegetasi seperti NDVI dan SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) yang memberikan informasi tentang produktivitas tanaman dan tingkat stres lingkungan [28][7]. Pemanfaatan sistem pesawat nirawak (UAV) dengan sensor multispektral juga memperkuat akurasi pemetaan dan evaluasi kondisi tanaman secara lebih detail pada skala lahan yang lebih kecil, sehingga meningkatkan efisiensi dan pengambilan keputusan dalam pengelolaan lahan pertanian [8].

3.3 Perubahan Iklim dan Dampaknya terhadap Pertanian

Perubahan iklim berupa peningkatan suhu global dan pola curah hujan, telah memberikan tekanan besar pada sistem pertanian dengan mempengaruhi produktivitas dan kesesuaian lahan [1][12]. Fenomena seperti kekeringan meteorologi (defisit curah hujan dari kondisi normal) dan kejadian cuaca ekstrem dapat mengurangi hasil panen dan menurunkan kualitas lahan yang menyebabkan penurunan kapasitas produksi pertanian secara signifikan [15][29]. Perubahan ini juga memicu pergeseran batas geografis kesesuaian tanaman, salah satunya kopi, yang sangat sensitif terhadap parameter iklim seperti suhu, kelembaban, dan curah hujan [2][30]. Oleh karena itu, adaptasi berbasis data ilmiah sangat diperlukan guna mempertahankan keberlanjutan pertanian kopi di tengah dinamika iklim global.

3.4 Penggunaan Penginderaan Jauh untuk Analisis Dampak Perubahan Iklim pada Kopi

Penginderaan jauh memainkan peran sentral dalam menganalisis dampak perubahan iklim terhadap produksi kopi dengan menyediakan data spasial dan temporal yang dapat digunakan untuk memetakan kesesuaian lahan, memadukan kesehatan tanaman dan memprediksi hasil panen [3][11]. Indeks vegetasi seperti NDVI dan EVI digunakan untuk menilai stres tanaman akibat perubahan kondisi iklim, serta mengidentifikasi kawasan yang rentan terhadap perubahan penggunaan lahan dan degradasi lahan [8][5]. Kombinasi data iklim, penggunaan lahan, dan parameter vegetasi melalui platform SIG dan model pembelajaran mesin memungkinkan analisis dinamis yang efektif, membantu pengelola kopi mengantisipasi dan merencanakan kondisi terhadap dampak perubahan iklim [9][31]. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan pengurangan risiko, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan untuk kelangsungan sistem agroekologi kopi secara menyeluruh [32][24].

3.5 Evolusi Penelitian Penginderaan Jauh dan Perubahan Iklim pada Tanaman Kopi

Penelitian mengenai penginderaan jauh dan perubahan iklim terkait tanaman kopi telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir, mengikuti kemajuan teknologi satelit dan model prediksi iklim. Awalnya, penelitian menggunakan indeks vegetasi sederhana seperti NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) untuk mengamati perubahan tutupan lahan dan produktivitas tanaman kopi [34][5]. Kemudian, metode ini ditingkatkan dengan penggunaan data multispektral dan hiperspektral, serta algoritma pembelajaran mesin untuk klasifikasi tutupan lahan dan identifikasi gangguan seperti penyakit dan kekeringan [8][5].

Studi terbaru juga mengintegrasikan model iklim dan data penginderaan jauh untuk memperkirakan dampak perubahan iklim terhadap kesesuaian lahan dan produktivitas kopi secara spasial dan temporal[1][2]. Perkembangan ini menunjukkan tren berkembangnya integrasi data iklim, penggunaan teknologi UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), dan pembelajaran mesin sebagai alat yang semakin canggih dalam pengelolaan dan adaptasi pertanian kopi terhadap perubahan iklim.

3.6 Studi Kunci Tentang Penginderaan Jauh, Perubahan Iklim, dan Kopi

Penelitian terdahulu tentang penginderaan jauh, perubahan iklim, dan tanaman kopi telah menghasilkan temuan-temuan penting yang memperkaya pemahaman mengenai hubungan antara dinamika iklim global dan produktivitas kopi. Kajian tersebut menyoroti pada peran penting teknologi penginderaan jauh dalam memadukan vegetasi dan kondisi pertumbuhan kopi melalui indeks vegetasi serta mengidentifikasi dampak variabilitas iklim, khususnya fenomena *El Nino Southern Oscillation* (ENSO), terhadap pola produktivitas dan kesesuaian lahan kopi. Temuan tersebut memberikan dasar ilmiah untuk strategi pengembangan adaptasi terhadap perubahan iklim serta pengelolaan pertanian kopi yang lebih terinformasi dan berkelanjutan. Tabel 1 menyajikan ringkasan temuan kunci tersebut sebagai referensi utama dalam kajian lanjutan.

3.7 Perspektif yang Bertentangan dalam Penelitian

Meskipun penginderaan jauh telah menjadi alat penting dalam studi perubahan iklim dan pertanian kopi, muncul beberapa tantangan terkait akurasi dan transmisi data yang digunakan. Beberapa peneliti mengkhawatirkan ketergantungan berlebihan pada NDVI dan indeks serupa, mengingat sensitivitasnya terhadap faktor topografi dan kondisi tanah, yang dapat menimbulkan bias dalam estimasi produktivitas tanaman kopi [33][27]. Perbedaan metodologi dalam pemodelan iklim dan penyesuaian indeks vegetasi menimbulkan perdebatan tentang star analisis terbaik untuk prediksi kesesuaian lahan kopi [5][1]. Penggunaan pembelajaran mesin juga menghadapi

tantangan dalam model transparansi dan kebutuhan data pelatihan yang besar dan beragam agar hasilnya valid di berbagai wilayah [8][11]. Berbagai tantangan ini menegaskan perlunya pendekatan multi-metode dan validasi lapangan untuk meningkatkan kredibilitas hasil penelitian.

Tabel 1. TEMUAN KUNCI DARI PENELITIAN SEBELUMNYA

Peneliti dan tahun	Fokus Penelitian	Metode dan Data yang Digunakan	Kontribusi Utama
Chemura et al. (2017)	Identifikasi tingkat stres air daun kopi menggunakan penginderaan jauh	Penginderaan jauh, pembelajaran mesin	Indikasi stres air untuk pengelolaan tanaman kopi
Moat et al. (2019)	Proyeksi risiko kepunahan Arabika kopi akibat perubahan iklim	Model iklim, data tutupan lahan	Dampak perubahan iklim terhadap kelangsungan kopi liar
Valente et al. (2024)	Pemantauan tanaman kopi yang rusak karena embun beku menggunakan UAV dan indeks vegetasi	UAV, NDVI, indeks vegetasi	Pemantauan spasial kerusakan embun beku pada tanaman kopi
Fekadu and arege (2025)	Zonasi kesesuaian lokasi kopi di Ethiopia menggunakan GIS dan parameterisasi	Penginderaan jauh, GIS, dan data USGS	Klasifikasi kesesuaian tanah dan iklim untuk kopi
Nagashre e et al. (2025)	Pemetaan dan analisis kesesuaian agro-ekosistem kopi menghadapi perubahan iklim	Penginderaan jauh dan data iklim	Identifikasi perubahan kesesuaian lahan global kopi
Galeana-Pizaña and Manson (2025)	Analisis spasial intensifikasi kopi di Meksiko	Penginderaan jauh dan analisis multivariat	Identifikasi pola intensifikasi dan pengaruh iklim
Chidodo et al. (2025)	Perubahan tutupan lahan di daerah aliran sungai untuk aplikasi pertanian kopi	Kungan NDVI, perangkat lunak GIS	Kaitan tata guna lahan dengan kesesuaian iklim kopi

3.8 Tantangan dan kendala Pendekatan Penginderaan Jauh dalam Menganalisis Dampak Perubahan Iklim terhadap Produktivitas Kopi

Tantangan utama dalam penggunaan penginderaan jauh untuk menganalisis dampak perubahan iklim terhadap produktivitas kopi adalah kompleksitas interaksi antara variabel iklim, penggunaan lahan, dan kondisi vegetasi yang harus diintegrasikan secara simultan. Variasi iklim seperti suhu, curah hujan, serta kejadian ekstrem seperti kekeringan atau embun beku memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kesesuaian lahan dan kesehatan tanaman kopi, namun penginderaan data jauh sering kali menghadapi kesulitan dalam menangkap dinamika spasial dan temporal yang heterogen ini secara akurat [1][34]. Ambiguitas dalam interpretasi nilai indeks vegetasi seperti NDVI dan EVI sering terjadi karena pengaruh faktor non-vegetatif seperti penggunaan lahan yang berubah dan kehadiran tanaman lain di sekitarnya, yang menyebabkan tantangan dalam mendapatkan estimasi produktivitas kopi yang tepat [9][8].

Kendala teknis dan metodologi seperti resolusi spasial dan temporal citra satelit, pemilihan indeks vegetasi yang paling sesuai, serta keterbatasan pemodelan pemodelan menjadi hambatan dalam mendukung keputusan adaptasi berbasis data. Misalnya, resolusi citra satelit yang rendah dapat menyediakan detail penting terkait pola tanam kopi, sedangkan penggunaan algoritma pembelajaran mesin memerlukan pelatihan data yang representatif dan beragam untuk akurasi tinggi [31][11]. Variabilitas data iklim yang cukup besar memerlukan integrasi data multisumber dan pemodelan dinamis yang kompleks agar mampu melakukan prediksi yang akurat tentang dampak perubahan iklim terhadap produktivitas kopi [35][32].

Terakhir, tantangan sosial dan ekologis juga muncul dalam penerapan teknologi penginderaan jauh di lapangan, seperti keterbatasan akses data yang memadai, kurangnya kapasitas teknis di antara petani kecil, dan dinamika perubahan penggunaan lahan yang cepat yang sulit dipantau secara real-time [3]. Perubahan iklim yang menuntut pengelolaan adaptif dan mitigasi harus didukung oleh kebijakan berbasis bukti yang akurat dari penginderaan jauh, namun sering kali masih terhambat oleh kurangnya koordinasi antar pemangku kepentingan dan sistem informasi terintegrasi [27][36].

IV. PEMBAHASAN

Perubahan iklim yang ditandai dengan peningkatan suhu dan perubahan pola curah hujan telah menjadi tantangan utama dalam mempertahankan produktivitas kopi di seluruh dunia. Penginderaan jauh menjadi salah satu pendekatan penting yang memungkinkan pemantauan

dan analisis dinamika spasial perubahan iklim serta dampaknya terhadap agroekosistem kopi secara kontinyu dan menyeluruh. Melalui penggunaan berbagai indeks vegetasi serta data citra satelit multispektral dan multisensor, penginderaan jauh mampu memetakan kesesuaian lahan, mendeteksi stres tanaman, serta memprediksi hasil panen kopi dalam konteks perubahan iklim [1][11][8].

Model prediksi produksi kopi perlu mempertimbangkan jenis kopi, seperti Arabika dan Robusta, karena jenis kopi yang berbeda memiliki karakteristik morfologi dan fisiologi yang mempengaruhi respon spektral tanaman. Kopi dengan karakteristik berbeda akan menghasilkan spektral data yang berbeda pula, sehingga citra satelit akan mengenali dan mengklasifikasikannya sebagai objek yang berbeda. Studi dengan data hyperspectral dan multispectral seperti Sentinel-2 MSI telah menunjukkan bahwa perbedaan jenis kopi ini dapat dideteksi secara akurat, yang sangat penting untuk meningkatkan ketepatan pemodelan dan prediksi hasil produksi kopi [37][5].

Respon spektral tanaman kopi juga dipengaruhi oleh umur tanaman kopi sehingga peta tematik yang dikembangkan berdasarkan umur tanaman dapat memperbaiki estimasi produksi. Hal ini menunjukkan bahwa faktor usia kopi perlu dimasukkan ke dalam model prediksi agar hasilnya lebih representatif dan akurat [5]. Penggunaan Indeks vegetasi sangat penting untuk memprediksi produktivitas tanaman dan membedakan jenis tanaman kopi berdasarkan faktor spektral. Indeks vegetasi ini memvisualisasikan tingkat kesehatan dan produktivitas tanaman kopi dengan memberikan gambaran yang jelas pada citra satelit [38]. Integrasi data iklim dan penggunaan teknologi pembelajaran mesin memperkuat akurasi evaluasi dampak iklim dan lanskap pada produksi kopi [9][32]. Meskipun demikian, terdapat kesenjangan penelitian yang perlu diatasi agar penginderaan jauh dapat digunakan secara lebih optimal di sektor kopi (Tabel 2).

Pemanfaatan penginderaan jauh telah terbukti efektif dalam menyediakan informasi yang dibutuhkan untuk mengelola dampak perubahan iklim pada produksi kopi, mulai dari pemantauan kesehatan tanaman, prediksi hasil panen, hingga perencanaan adaptasi berbasis lingkungan. Integrasi data iklim, indeks vegetasi, dan penggunaan teknologi machine learning serta UAV semakin memperkuat sistem penilaian yang komprehensif dan real time. Seiring dengan berkembangnya teknologi satelit dengan resolusi tinggi dan kemampuan penyimpanan data yang semakin canggih, pendekatan penginderaan jauh membuka peluang besar untuk mendukung keputusan manajemen kopi yang adaptif terhadap perubahan iklim [1][9][8].

Tabel 2. KESENJANGAN PENELITIAN DAN REKOMENDASI

No	Kesenjangan Penelitian	Rekomendasi
1	Keterbatasan data resolusi spasial dan temporal untuk deteksi stres tanaman secara dini	Integrasi data multi-sensor time-series untuk monitoring dinamis
2	Kurangnya model prediksi yang mengkombinasikan kondisi iklim, indeks vegetasi, dan data tanah	Penggunaan model machine learning terpadu dengan input data iklim, citra satelit, dan variabel tanah serta sosial-ekonomi
3	Terbatasnya studi kasus yang menghubungkan perubahan iklim dan produktivitas kopi di berbagai wilayah sentra produksi	Penambahan studi multi-lokasi dengan konteks agroklimat dan penggunaan dataset global serta lokal untuk analisis komparatif
4	Kurangnya evaluasi efek interaksi antara perubahan penggunaan lahan dan mikroklimat pada produksi kopi	Pemodelan spasial interaksi penggunaan lahan dan mikroklimat dengan data penginderaan jauh beresolusi tinggi

Namun demikian, keberhasilan aplikasi penginderaan jauh sangat bergantung pada ketersediaan data yang berkualitas, validasi lapangan yang memadai, serta model pengembangan yang mampu mengakomodasi kompleksitas interaksi iklim, tanah, dan praktik budidaya kopi di berbagai wilayah produksi. Penelitian lebih lanjut perlu difokuskan pada pendalaman integrasi berbagai data multisumber dan peningkatan kerjasama lintas disiplin untuk mewujudkan sistem pemantauan dan prediksi produksi kopi yang tahan iklim dan berkelanjutan [11][5][32]. Dengan demikian, penginderaan jauh dapat menjadi alat penting dalam strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim di sektor kopi global.

Terdapat beberapa keterbatasan dalam penelitian ini. Salah satu batasan utama adalah ketergantungan pada basis data dan literatur yang tersedia hingga saat ini, yang mungkin belum mencakup seluruh penelitian terbaru atau studi-studi dari wilayah tertentu dengan batasan akses publik. Kriteria seleksi yang digunakan untuk mengumpulkan dan mereview publikasi juga dapat membatasi cakupan observasi ini, terutama dalam pemilihan artikel berdasarkan fokus pada penggunaan indeks vegetasi, penginderaan jauh, serta relevansi dengan produktivitas dan kesesuaian lahan kopi dalam konteks perubahan iklim. Oleh karena itu, hasil dan kesimpulan yang disajikan hendaknya dipahami sebagai gambaran yang bersifat indikatif dan terus perlu dikembangkan seiring dengan semakin banyaknya data dan penelitian yang muncul di masa depan.

V. KESIMPULAN

Tinjauan literatur ini mengonfirmasi peran penting penginderaan jauh dan SIG dalam mendukung analisis dampak perubahan iklim terhadap produktivitas tanaman kopi. Teknologi seperti indeks vegetasi multispektral (NDVI, EVI, SAVI), penggunaan citra satelit resolusi tinggi, dan pemanfaatan UAV telah memperkuat kemampuan kesesuaian lahan dan pemantauan stres tanaman secara lebih presisi. Integrasi data iklim, penggunaan lahan, dan metode pembelajaran mesin kini menjadi fokus utama untuk mengatasi kompleksitas interaksi lingkungan dan antropogenik yang mempengaruhi agroekosistem kopi. Namun keterbatasan dalam resolusi data, model terintegrasi, dan cakupan studi lintas wilayah masih menjadi tantangan yang harus diatasi. Selain itu, aspek sosio-ekologis termasuk kapasitas teknis dan akses data di lapangan perlu mendapat perhatian. Kedepannya, penelitian harus lebih ditekankan pada pengembangan sistem pemantauan dinamis yang menggabungkan multisumber data dan pendekatan lintas disiplin guna mendukung adaptasi dan mitigasi perubahan iklim secara efektif di sektor kopi. Dengan pendekatan tersebut, penginderaan jauh dapat menjadi alat penting dalam menjaga keberlanjutan produksi kopi di tengah tantangan perubahan iklim global.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Pembiayaan dan Asesmen Pendidikan Tinggi (PPAPT) Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi sebagai penyelenggara Beasiswa Program Doktor untuk Dosen Indonesia (PDDI) tahun 2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nagashree, M. K., Trivedi, S., Mukharib, D. S., Hebbbar, R., Srivastav, S. K., and Chauhan, P., "Earth observation based mapping site-suitability analysis of coffee agro-ecosystem in the face of climate change," *In Sustainable Development Perspectives in Earth Observation Elsevier*, pp. 269-285, 2025.
- [2] Moat, J., Gole, T. W., and Davis, A. P., "Least concern to endangered: Applying climate change projections profoundly influences the extinction risk assessment for wild Arabica coffee," *Global change biology*, vol. 25, no. 2, pp. 390-403, 2019.
- [3] Fekadu, A., and arege, B., "GIS parametric based coffee site suitability zoning in North Shewa zone of Oromia region, central Ethiopia," *Environmental Sustainability Indicators*, vol 26, 100674, 2025.
- [4] Bikis, A., Engdaw, M., Pey, D., and Pey, B. K., "The impact of urbanization on l use l cover change using geographic information system remote sensing: a case of Mizan Aman City Southwest Ethiopia," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, pp. 12014, 2025.
- [5] Chemura, A., and Mutanga, O., "Developing detailed

- age-specific thematic maps for coffee (*Coffea arabica* L.) in heterogeneous agricultural landscapes using remote forests applied on Landsat 8 multispectral sensor," *Geocarto International*, vol.32, no 7, pp759-776, 2017.
- [6] Nigussie, W., Al-Najjar, H., Zhang, W., Yirsaw, E., Nega, W., Zhang, Z., and Kalantar, B, "Enhancing coffee agroforestry systems suitability using geospatial analysis sentinel satellite data in geddo zone, Ethiopia," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 24, no.19, pp. 6287, 2024.
- [7] Vilela, E. F., Castro, G. D. M. D., Marin, D. B., Santana, C. C., Leite, D. H., Matos, C. D. S. M., Silva, R.A., Rossi, G. Bambi, G., Conti., and Venzon, M, "Remote Monitoring of Coffee Leaf Miner Infestation Using Machine Learning," *AgriEngineering*, vol. 6, no. 2, pp. 1697-1711, 2024.
- [8] Valente, G. F., Ferraz, G. A. E. S., Schwerz, F., Faria, R. D. O., Fernes, F. A., and Marin, D. B, "Remotely Piloted Aircraft for Evaluating the Impact of Frost in Coffee Plants: Interactions between Plant Age Topography," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 18, pp. 3467, 2024
- [9] Bojer, A. K., Abshare, M. W., Mesfin, F., and Al-Quraishi, A. M. F, "Assessing climate landuse impacts on surface water yield using remote sensing machine learning" *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, pp. 18477, 2025.
- [10] Martello, M., Molin, J. P., Bazame, H. C., Tavares, T. R., and Maldaner, L. F, "Use of active sensors in coffee cultivation for monitoring crop yield," *Agronomy*, vol. 12, no. 9, 2118, 2022.
- [11] Galeana-Pizaña, J. M., and Manson, R. H, "Mapping Coffee Intensification in Mexico: A Multivariate Spatial Analysis Approach," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 9, 1649756, 2025.
- [12] Chalchissa, F. B., Diga, G. M., Feyisa, G. L., and Tolossa, A. R, "Impacts of extreme agroclimatic indicators on the performance of coffee (*Coffea arabica* L.) aboveground biomass in Jimma Zone, Ethiopia," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, 2022.
- [13] Bento, N. L., Silva Ferraz, G. A. E., Santana, L. S., de Oliveira Faria, R., da Silva Amorim, J., de Lourdes Oliveira e Silva, Mirian., Silva, Michel Martins Araujo and Alonso, D. J. C, "Soil compaction mapping by plant height spectral responses of coffee in multispectral images obtained by remotely piloted aircraft system," *Precision Agriculture*, vol. 25, no. 2, pp. 729-750, 2024.
- [14] Nigussie, W., Al-Najjar, H., Zhang, W., Yirsaw, E., Nega, W., Zhang, Z., and Kalantar, B, "Enhancing coffee agroforestry systems suitability using geospatial analysis sentinel satellite data in geddo zone, Ethiopia," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 24, no. 19, 6287, 2024.
- [15] Luc, H. C., Van Viet, L., and Hung, B. D. (2025). Determining suitable meteorological drought vegetation indices for monitoring drought crop yield in Srepok River basin, Vietnam. *Agriculture Natural Resources*, vol. 59, no.1, 2025.
- [16] Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., Betbeder, J., De Aballeyra, D., PD Ferraz, R., Lebourgeois, V., Lelong, C., Simoes, M. and R. Verón, S, "Remote sensing and cropping practices: A review," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 1, pp. 99, 2018.
- [17] Pangaribuan, I. J. P., Araaf, R. T., Ahamed, T., Sunkar, A., and Hidayati, S, "Land Suitability Assessment for Arabica Coffee Plantations in Central Aceh Indonesia Using Fuzzy Membership Theory," In *Remote Sensing Application II: A Climate Change Perspective in Agriculture*, Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 239-254, 2024.
- [18] Tridawati, A., Wikantika, K., Susantoro, T. M., Harto, A. B., Darmawan, S., Yayusman, L. F., and Ghazali, M. F, "Mapping the distribution of coffee plantations from multi-resolution, multi-temporal, multi-sensor data using a random forest algorithm," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 23, 3933, 2020.
- [19] Van Eck, N., and Waltman, L, "Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping," *scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp 523-538, 2010.
- [20] Bakar, U. A., Sayeed, M. S., Razak, S. F. A., Yogarayan, S., Amodu, O. A., & Mahmood, R. A. R. (2023). A method for analyzing text using VOSviewer. *MethodsX*, 11, 102339.
- [21] Nandiyanto, A. B. D., and Al Huseini, D, "Bibliometric analysis of engineering research using vosviewer indexed by google scholar," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 883-894, 2022.
- [22] Lemenkova, P., and Debeir, O, "Satellite image processing by Python R using Landsat 9 OLI/TIRS SRTM DEM data on Côte d'Ivoire, West Africa," *Journal of imaging*, vol.8, no. 12, p.317, 2022.
- [23] de Carvalho, E., de Assis, G. A., Martins, G. D., Marques, D. J., dos Santos, E. A., Xavier, L. C. M., ... and Zampiroli, R, "Intercropped soybean plant population in a coffee plantation its effects on agronomic parameters geospatial information," *Agronomy*, vol. 14, no. 2, p. 343, 2024.
- [24] Sarmiento, C. S. A., Lemos, O. L., Boffo, E. F., Matsumoto, S. N., Castro, I. T. P. D., and Alvarenga, Y. A, "Relations between sensory quality spectral indices in Brazilian arabica coffees," *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 97, no. 1, e20240921, 2025.
- [25] Ghosh, P., and Kumpatla, S. P, "GIS applications in agriculture," *Geographic information systems*

- applications in coastal studies*, pp. 89-114, 2022.
- [26] Muruganantham, P., Wibowo, S., Grhi, S., Samrat, N. H., and Islam, N., "A systematic literature review on crop yield prediction with deep learning remote sensing," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 9, pp. 1990, 2022.
- [27] Chidodo, S., Zhang, L., Zarei, A., and Feger, K. H., "Remote sensing-based assessment of four decades of land use/cover change in the Sigi River Watershed, East Usambara Mountains, Tanzania," *Frontiers in Remote Sensing*, vol. 6, 1594331, 2025.
- [28] Airane dos Santos Silva, S., Ferraz, G. A. E. S., Figueiredo, V. C., Valente, G. F., Volpato, M. M. L., and Machado, M. L., "Soil Moisture Spatial Variability Water Conditions of Coffee Plantation," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 4, pp. 110, 2025
- [29] Alqadhi, S., Mallick, J., and Hang, H. T., "Assessing drought trends vegetation health in arid regions using advanced remote sensing techniques: a case study in Saudi Arabia," *Theoretical Applied Climatology*, vol. 156, no. 1, pp. 33, 2025.
- [30] Abdelwahab, S. I., Taha, M. M. E., Jerah, A. A., Aljahdali, I. A., Oraibi, B., Alfaifi, H. A., Abdullah, S. M., Alzahrani, A. Oraibi, O., Babiker, Y., and Farasani, A., "Coffee arabica research (1932–2023): Performance, thematic evolution mapping, global landscape, emerging trends," *Heliyon*, vol. 10, no. 16, 2024.
- 31 Bedoya-Soto, J. M., Acevedo, E., Sauchyn, D., Poveda, G., and Urán, A., "El Niño-Southern Oscillation impacts in a coffee growing region of Colombia adaptations mechanisms among coffee producers," *Journal of Environmental Studies Sciences*, pp1-21, 2025.
- [32] Nguyen, T., Brstetter, J., Kapoor, A., Gupta, J. K., and Grover, A., "Climax: A foundation model for weather climate. *arXiv preprint arXiv:2301.10343*, 2023.
- [33] Nogueira, S., Moreira, M. A., and Volpato, M. M., "Relationship between coffee crop productivity vegetation indexes derived from oli/lsat-8 sensor data with without topographic correction," *Engenharia Agrícola*, vol. 38, pp. 387-394.
- [34] Sholikah, D. H., Jamaluddin, J., Hasyim, A. W., Rayes, M. L., Aditya, H. F., and Soemarno, S., "Mesofarm classification its relationship with smallholder coffee production in the Malang Regency, Indonesia," *SAINS TANAH-Journal of Soil Science Agroclimatology*, vol. 22, no. 1, pp. 75-88, 2025.
- [35] Felix, F. C., Avalos, F. A., Lima, W. D., Cândido, B. M., Silva, M. L., and Mincato, R. L., "Seasonal behavior of vegetation determined by sensor on an unmanned aerial vehicle," *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 93, no. 1, e20200712, 2021.
- [36] Moisa, M. B., Roba, Z. R., Purohit, S., Deribew, K. T., and Gameda, D. O., "Evaluating the impact of land use land cover change on soil moisture variability using GIS remote sensing technology in southwestern Ethiopia," *Environmental Monitoring Assessment*, vol. 197, no. 7, pp. 1-21, 2025.
- [37] Kebede, G., Tawona Mudereri, B., Abdel-Rahman, E. M., Mutanga, O., Landmann, T., Odindi, J., Motisi, N., Pinard, F., Tonnang, H. E., " Discriminating Robusta coffee (*Coffea canephora*) cropping systems using leaf-level hyperspectral data," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 18, no. 4, pp 044503-044503, 2024.
- [38] Hunt, D. A., Tabor, K., Hewson, J. H., Wood, M. A., Reymondin, L., Koenig, K., Schmitt Harsh, M., and Follett, F., "Review of remote sensing methods to map coffee production systems," *Remote Sens.* vol. 12, no. 12, p 2041, 2020.