

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pertanian masih menjadi sektor penopang penting perekonomian daerah di Kabupaten Pamekasan sekaligus sumber utama pangan dan pendapatan rumah tangga pedesaan. Data Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan bahwa pada tahun 2024 luas panen padi di Kabupaten Pamekasan sekitar 19,64 ribu hektare dengan produksi sekitar 101,50 ribu ton gabah kering giling, dan angka ini menurun dibandingkan tahun sebelumnya (*Pada-2024*, n.d.). Penurunan produksi ini antara lain dikaitkan dengan variabilitas curah hujan dan anomali iklim yang memengaruhi keberhasilan musim tanam (Mulyaqin, 2020). Kondisi tersebut menegaskan bahwa pengelolaan lahan dan perencanaan komoditas di tingkat daerah tidak dapat hanya mengandalkan pola tanam tradisional, tetapi perlu didukung oleh informasi spasial yang lebih rinci dan berbasis data.

Sejalan dengan itu, daya dukung lahan terhadap komoditas pertanian ditentukan oleh kombinasi faktor tanah, iklim, dan topografi. Keragaman sifat tanah (pH, kandungan bahan organik), distribusi curah hujan, suhu udara, dan penyinaran antarwilayah menyebabkan respon tanaman terhadap input dan teknologi tidak seragam, bahkan dalam satu kabupaten (Adhikari et al., 2023). Konsep *Agro-Ecological Zones (AEZ)* diperkenalkan untuk mengelompokkan wilayah ke dalam zona yang relatif homogen berdasarkan kombinasi faktor-faktor biofisik tersebut, sehingga rekomendasi pengelolaan dan pengembangan komoditas dapat disesuaikan dengan karakter lokal (Sexton-Bowser et al., 2026).

Berbagai kajian terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan *AEZ* untuk mendukung perencanaan pertanian, misalnya penentuan zona agroekologi di Keerom, Papua, untuk arahan pengembangan tanaman pangan dan konservasi, serta analisis zona agroekologi untuk pengelolaan daerah aliran sungai secara berkelanjutan (Damayanti, 2013). Penentuan zonasi agroekologi umumnya didasarkan pada unsur fisik lingkungan meliputi iklim, hidrologi, bentuklahan, sumber daya tanah, vegetasi, serta penggunaan lahan (*Agro-Ecological Zoning*, n.d.). Namun, banyak kajian tersebut masih dilakukan pada skala yang relatif kasar,

menggunakan peta tanah dan iklim skala tinjau, sehingga variasi antar desa belum tergambar secara memadai

Pada saat yang sama, kebutuhan kebijakan saat ini mengarah pada pengelolaan pertanian spesifik lokasi. Pemerintah daerah dituntut menyusun program pengembangan komoditas dan intervensi teknis yang menjawab keragaman kondisi di tingkat desa, bukan sekadar rata-rata kecamatan atau kabupaten. Tanpa zonasi agroekologi yang cukup rinci hingga level desa, penetapan komoditas unggulan, penyaluran bantuan sarana produksi, maupun perencanaan infrastruktur air berisiko tidak efisien karena tidak mempertimbangkan perbedaan kondisi biofisik antardesa.

Dalam konteks tersebut, perkembangan data terbuka dan komputasi *cloud* beberapa tahun terakhir membuka peluang untuk menyusun zonasi agroekologi dengan resolusi lebih tinggi. *Google Earth Engine (GEE)* menjadi salah satu platform pemrosesan geospasial yang banyak dimanfaatkan untuk pemetaan lahan pertanian, perubahan lahan sawah, maupun pemantauan kekeringan karena menyediakan akses langsung ke arsip citra satelit dan *dataset* iklim global serta fasilitas komputasi di sisi server (Siska et al., 2022). Siska dkk. memanfaatkan *GEE* untuk memetakan perubahan lahan sawah di Kabupaten Sukabumi dengan klasifikasi citra Landsat multiwaktu, sedangkan Hermawan dkk. menggunakan *GEE* untuk analisis geospasial perubahan penggunaan lahan sawah (Mulyaqin et al., 2022).

Selaras dengan ketersediaan platform tersebut, dalam konteks sifat tanah, *SoilGrids 2.0* menyediakan peta global sifat tanah (seperti pH dan kandungan karbon organik) pada resolusi 250 m yang dihasilkan melalui pemodelan digital berbasis *machine learning* (Poggio et al., 2021). *Dataset* ini banyak dimanfaatkan untuk analisis kesesuaian lahan dan pemodelan produktivitas karena cakupannya yang global, resolusinya yang cukup halus, dan disertai informasi yang konsisten. Untuk iklim permukaan darat, *ERA5-Land* merupakan reanalisis iklim resolusi tinggi (~9 km) yang memberikan gambaran konsisten evolusi variabel seperti suhu udara dan curah hujan harian selama beberapa dekade (Muñoz-Sabater et al., 2021). Kedua *dataset* tersebut telah terintegrasi dalam katalog *GEE* sehingga memungkinkan ekstraksi deret waktu multi-tahun pada satuan wilayah kecil seperti desa secara efisien.

Meskipun infrastruktur data dan komputasi sudah mendukung, persoalan berikutnya adalah bagaimana memanfaatkan himpunan fitur tanah dan iklim multi-tahun tersebut untuk membentuk zona agroekologi tingkat desa yang bermakna. Berbagai metode *clustering* telah diterapkan dalam studi zonasi, mulai dari *K-Means*, *Agglomerative*, hingga pendekatan berbasis analitik hirarki *Analytical Hierarchy Process (AHP)* dan *fuzzy* (Damayanti, n.d.), (Lykhovyd et al., n.d.). Metode-metode tersebut relatif sudah cukup banyak diimplementasikan, tetapi umumnya mensyaratkan penetapan jumlah kluster di awal, sensitif terhadap bentuk kluster yang cenderung bulat, dan kurang efektif menangani data dengan variasi kepadatan serta keberadaan *outlier*. Pada data lingkungan yang heterogen secara spasial, asumsi tersebut dapat menyebabkan terbentuknya zonasi yang tidak sepenuhnya merepresentasikan struktur alami data (Wahyuni et al., 2021).

Sebagai alternatif atas keterbatasan tersebut, *Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN)* merupakan pengembangan dari *DBSCAN* yang memadukan pendekatan berbasis kepadatan dengan struktur hirarki untuk mengidentifikasi kluster pada berbagai tingkat kerapatan (McInnes et al., 2017). *HDBSCAN* tidak mengharuskan menentukan jumlah kluster sejak awal, mampu mendeteksi kluster dengan bentuk bebas, dan secara eksplisit mengidentifikasi titik-titik yang dianggap *noise*. Studi terkini di Indonesia menunjukkan bahwa *HDBSCAN* mulai digunakan untuk pengelompokan data spasial dan nonspasial, untuk mengelompokkan pengguna aplikasi, indikator perumahan, maupun wilayah administratif berdasarkan indikator sosial-ekonomi (Dwi Handayani & Rosyida, 2023a).

Secara spesifik, Amalina dan Fauzan menerapkan *HDBSCAN* untuk mengelompokkan desa atau kelurahan di Kabupaten Buleleng berdasarkan data potensi desa, dengan tujuan mengidentifikasi kelompok desa yang memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan pembangunan (Amalina & Fauzan, 2024). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa *HDBSCAN* dapat menghasilkan pengelompokan desa yang lebih adaptif terhadap variasi densitas data dibandingkan metode *clustering* konvensional. Meski demikian, sebagian besar penerapan *HDBSCAN* di Indonesia sejauh ini masih berfokus pada indikator sosial-ekonomi

atau perilaku pengguna, belum pada kombinasi fitur tanah-iklim multi-tahun untuk tujuan zonasi agroekologi.

Di sisi lain, kajian *AEZ* dan kesesuaian lahan di Indonesia umumnya masih didominasi pendekatan berbasis aturan *rule-based* dan penilaian pakar dengan memanfaatkan peta tanah dan iklim skala tinjau, serta belum sepenuhnya mengintegrasikan *dataset* global resolusi tinggi seperti *SoilGrids 2.0* dan *ERA5-Land* melalui platform komputasi *cloud* (Damayanti, n.d.). Pada skala kabupaten, khususnya di Pamekasan, belum ditemukan kajian yang secara eksplisit membangun zona agroekologi tingkat desa dengan memanfaatkan kombinasi data tanah-iklim multi-tahun dari *GEE* dan algoritma *HDBSCAN*.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat beberapa celah penelitian yang dapat diidentifikasi. Pertama, terdapat kebutuhan akan zonasi agroekologi tingkat desa di Kabupaten Pamekasan yang mampu menangkap keragaman sifat tanah dan iklim secara lebih rinci daripada peta skala tinjau yang umum digunakan. Kedua, meskipun *GEE* dan *dataset* global seperti *SoilGrids 2.0* dan *ERA5-Land* telah banyak dimanfaatkan untuk pemetaan pertanian dan perubahan penggunaan lahan (Muñoz-Sabater et al., 2021), belum banyak studi yang menggunakannya untuk menyusun fitur tanah-iklim multi-tahun yang terintegrasi pada level desa sebagai dasar zonasi agroekologi. Ketiga, walaupun *HDBSCAN* telah terbukti efektif untuk pengelompokan wilayah berbasis indikator sosial ekonomi (Amalina & Fauzan, 2024), penerapannya pada *clustering* data tanah dan iklim multi-tahun untuk membentuk zona agroekologi tingkat desa di Pamekasan belum dilaporkan.

Oleh karena itu, penelitian ini merespons celah tersebut dengan membangun zonasi agroekologi Kabupaten Pamekasan berbasis *clustering* data tanah dan iklim multi-tahun menggunakan *HDBSCAN*. Data sifat tanah (pH dan karbon organik) diperoleh dari *SoilGrids 2.0*, sedangkan variabel iklim (curah hujan, suhu, dan penyinaran) diekstraksi dari *ERA5-Land* melalui platform *Google Earth Engine* untuk periode 2014-2024. Fitur-fitur tersebut dirangkum pada tingkat desa, dinormalisasi, dan kemudian digunakan sebagai masukan *HDBSCAN* untuk menghasilkan zona-zona agroekologi yang relatif homogen. Struktur *cluster* yang dihasilkan dievaluasi menggunakan metrik internal seperti *Silhouette Coefficient* dan *Davies-Bouldin Index*, serta ditinjau koherensi spasial dan profil biofisiknya.

Dengan menggunakan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan menghasilkan peta zonasi agroekologi tingkat desa di Kabupaten Pamekasan yang dibangun dari data tanah-iklim multi-tahun yang konsisten, diperoleh melalui algoritma *clustering* yang adaptif terhadap variasi densitas dan mampu mengidentifikasi desa-desa yang berperilaku sebagai *noise*; dan memberikan ringkasan karakteristik biofisik tiap zona yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar awal perencanaan pengembangan komoditas dan intervensi teknologi di tingkat desa. Secara terukur, keberhasilan metode usulan akan dinilai dari kualitas klaster yang terbentuk (nilai metrik evaluasi internal dan proporsi *noise*) serta dari kemampuan zonasi untuk menjelaskan pola keragaman faktor tanah-iklim di Pamekasan secara lebih sistematis dibandingkan pendekatan nonklaster.

1.2. Perumusan Masalah

1.2.1. Permasalahan

Permasalahan utama yang dihadapi adalah bagaimana memodelkan keragaman faktor tanah dan iklim di Kabupaten Pamekasan dalam bentuk zona-zona agroekologi yang konsisten dan informatif, dengan memanfaatkan data multivariabel dan multi-tahun yang tersedia pada platform *Google Earth Engine*. Data tanah dan iklim yang bersumber dari *SoilGrids 2.0* dan *ERA5-Land* memiliki resolusi spasial dan temporal yang tinggi serta sifat statistik yang berbeda-beda, sehingga memerlukan tahapan prapemrosesan, penyelarasan satuan, dan normalisasi sebelum dapat dianalisis secara bersama-sama.

Banyak metode *clustering* tradisional mengharuskan penetapan jumlah klaster di awal dan mengasumsikan bentuk klaster yang relatif sederhana, sehingga berpotensi kurang representatif ketika diterapkan pada data lingkungan yang heterogen dan mengandung *outlier*. Pada saat yang sama, pemerintah daerah dan pemangku kepentingan membutuhkan representasi zona agroekologi yang mampu mengungkap pola-pola alami dalam data tanpa memaksakan struktur klaster tertentu. Dengan demikian, kedua permasalahan kunci yang diidentifikasi adalah:

- Pertama, bagaimana memanfaatkan data tanah dan iklim multi-tahun tingkat desa di Kabupaten Pamekasan untuk membentuk zona agroekologi yang mencerminkan struktur alami data, termasuk kemungkinan keberadaan desa-desa *outlier*.

- Kedua, bagaimana menilai kualitas dan stabilitas zona-zona yang terbentuk secara kuantitatif sehingga dapat dipertanggungjawabkan sebagai dasar analisis dan perencanaan.

1.2.2 Metode Usulan

Metode usulan dalam penelitian ini adalah pemodelan zonasi agroekologi tingkat desa di Kabupaten Pamekasan melalui penerapan algoritma *clustering HDBSCAN* pada data tanah dan iklim multi-tahun yang diperoleh dari platform *Google Earth Engine*. Data sifat tanah, seperti pH dan karbon organik, diekstraksi dari *SoilGrids 2.0*, sedangkan variabel iklim, meliputi curah hujan, suhu udara, dan penyinaran, diambil dari *dataset ERA5-Land* untuk periode 2014-2024. Seluruh data tersebut diolah dalam *GEE* dan kemudian diagregasikan ke dalam unit analisis desa melalui perhitungan statistik zonal sehingga diperoleh himpunan fitur tanah-iklim multi-tahun yang seragam untuk setiap desa. Tahap berikutnya adalah prapemrosesan yang mencakup penyelarasan sistem koordinat dan cakupan spasial, pemeriksaan nilai-nilai ekstrem yang tidak wajar, serta normalisasi (menggunakan *z-score*) agar setiap fitur berada pada skala yang sebanding dan tidak mendominasi proses *clustering*.

Setelah tahap prapemrosesan, algoritma *HDBSCAN* diterapkan pada himpunan fitur tersebut dengan beberapa kombinasi parameter (seperti *min_cluster_size* dan *min_samples*) yang dirancang sebagai skenario pemodelan. Untuk setiap skenario, hasil *cluster* dievaluasi menggunakan metrik internal *Silhouette Coefficient*, *Davies-Bouldin Index*, dan *Calinski-Harabasz* (dengan titik *noise* dikecualikan dari perhitungan). Pemilihan konfigurasi terbaik dilakukan berdasarkan skor gabungan dari ketiga metrik tersebut, jumlah klaster yang wajar, serta proporsi desa yang teridentifikasi sebagai *noise*. Konfigurasi parameter yang memberikan keseimbangan terbaik antara nilai metrik evaluasi, jumlah klaster yang wajar, dan proporsi *noise* yang dapat diterima dipilih sebagai model zonasi agroekologi final. Hasil klaster terbaik kemudian dipetakan ke dalam peta zona agroekologi tingkat desa dan dianalisis karakteristik biofisiknya melalui ringkasan statistik (rata-rata dan sebaran pH, karbon organik, curah hujan, suhu, dan penyinaran) untuk setiap zona. Dengan demikian, metode usulan ini tidak hanya menghasilkan pembagian desa ke dalam beberapa zona agroekologi yang relatif

homogen, tetapi juga menyediakan dasar kuantitatif untuk menilai kualitas pengelompokan dan menginterpretasikan perbedaan karakter biofisik antarzona.

1.2.3 Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan permasalahan dan metode usulan yang telah diuraikan, penelitian ini akan menjawab pertanyaan penelitian sebagai berikut:

1. Berapa struktur zona agroekologi terbaik (jumlah klaster dan proporsi desa yang teridentifikasi sebagai *noise*) yang diperoleh algoritma *HDBSCAN* pada data tanah dan iklim multi-tahun tingkat desa di Kabupaten Pamekasan?
2. Bagaimana karakteristik biofisik zona-zona agroekologi yang terbentuk berdasarkan variabel pH, karbon organik, curah hujan, suhu, penyinaran, dan elevasi, serta apa implikasinya terhadap pengelompokan wilayah tanam di Kabupaten Pamekasan?

1.3. Tujuan dan Manfaat

1.3.1. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan yang ingin dicapai, yaitu:

1. Menentukan struktur zona agroekologi terbaik pada tingkat desa di Kabupaten Pamekasan menggunakan algoritma *HDBSCAN* terhadap data tanah dan iklim multi-tahun yang diekstraksi melalui *Google Earth Engine*.
2. Mengevaluasi kualitas dan stabilitas klaster yang terbentuk menggunakan metrik evaluasi internal (*Silhouette Coefficient*, *Davies-Bouldin Indeks* dan *Calinski-Harabasz*) serta menyajikan karakteristik biofisik tiap zona sebagai dasar interpretasi agroekologi.

1.3.2. Manfaat Penelitian

1.3.2.1 Manfaat Ilmiah

1. Menyediakan pendekatan integrasi data tanah, iklim, dan topografi berbasis spasial-temporal multi-tahun pada unit analisis desa sebagai dasar pembentukan zonasi agroekologi.
2. Memberikan kontribusi metodologis pada pembentukan zonasi agroekologi tingkat desa melalui penerapan *HDBSCAN*, disertai evaluasi kualitas *cluster* (*Silhouette*, *DBI*, dan *CH*) serta interpretasi

zona menjadi profil agroekologi sebagai dasar rekomendasi awal komoditas.

1.3.2.2 Manfaat Praktis

1. Menyediakan peta zona agroekologi tingkat desa di Kabupaten Pamekasan yang dapat digunakan pemerintah daerah, penyuluh, dan pemangku kepentingan lain sebagai dasar awal perencanaan program pengembangan komoditas, penentuan paket teknologi, dan pengelolaan sumber daya lahan.
2. Mendukung pengambilan keputusan budidaya di tingkat desa agar lebih adaptif terhadap variasi biofisik antarwilayah, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan lahan dan stabilitas produksi pangan daerah.

1.4. Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih fokus dan terarah, maka ditetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Rentang waktu data tanah dan iklim yang digunakan adalah periode 2014-2024, yang diringkas menjadi fitur multi-tahun per desa.
2. Data yang digunakan meliputi 184 desa di Kabupaten Pamekasan.
3. Fitur terdiri dari pH, N, P, K, karbon organik, curah hujan, elevasi, suhu udara, dan penyinaran (jam/hari).

1.5 Sistematika Penulisan Skripsi

Pada penelitian ini, digunakan sistematika penulisan skripsi sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

Berisi landasan teori terkait Agro-Ecological Zoning, data tanah-iklim, dan metode *clustering*; serta tinjauan penelitian terdahulu 5 tahun terakhir yang relevan dengan zonasi agroekologi dan rekomendasi komoditas.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan sumber dan praproses data (penyelarasan satuan dan waktu), pembentukan zona dengan *HDBSCAN*, prosedur validasi dan penilaian koherensi spasial, serta rencana keluaran peta dan tabel.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi hasil praproses data, hasil zonasi (distribusi zona dan *noise*), evaluasi kualitas klaster, karakteristik/profil tiap zona, serta rekomendasi awal komoditas per zona.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan yang menjawab tujuan penelitian dan saran pengembangan.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi daftar referensi yang digunakan.