Sistem Informasi Geografis untuk Evaluasi Distribusi Pupuk Subsidi Berbasis Klasterisasi Skala Usaha Petani

1st Satria Duta Praja
Teknik Informatika
Telkom University Purwokerto
Banyumas, Indonesia
satriaprajaa@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Muhammad Lulu Latif Usman
Teknik Informatika
Telkom University Purwokerto
Banyumas, Indonesia
muhlulu@telkomuniversity.ac.id

3rd Yudha Islami Sulistya
Rekayasa Perangkat Lunak
Telkom University Purwokerto
Banyumas, Indonesia
yudhaislami@telkomuniversity.ac.id

***Abstract* - Distribusi pupuk subsidi di Indonesia masih menghadapi ketimpangan alokasi, rendahnya transparansi, dan keterbatasan evaluasi berbasis data spasial, sehingga menyulitkan perencanaan alokasi sesuai kebutuhan petani. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan Sistem Informasi Geografis (SIG) berbasis web yang terintegrasi dengan algoritma K-Means untuk mengevaluasi distribusi pupuk subsidi berdasarkan kondisi spasial petani di Desa Klapagading. Pengembangan sistem dilakukan secara iteratif melalui empat iterasi menggunakan metode Rapid Application Development (RAD) pada fase User Design, sehingga seluruh masukan pengguna diakomodasi secara bertahap. Proses klasterisasi menggunakan tiga variabel utama, yaitu luas lahan, produktivitas, dan jenis tanah, dengan jumlah klaster optimal yaitu k = 3 berdasarkan Elbow Method dan Silhouette Analysis, menghasilkan Silhouette Score 0.653, Calinski-Harabasz 1653, dan Davies–Bouldin Index 0.572. Integrasi hasil klasterisasi ke SIG menghasilkan visualisasi spasial yang informatif hingga tingkat kelompok tani. Semua fitur diuji secara fungsional dengan metode Black Box dan diverifikasi melalui User Acceptance Testing (UAT), dengan tingkat keberhasilan 100% sebagai hasil kumulatif dari empat iterasi pengembangan. Sistem ini berperan sebagai alat bantu evaluatif dalam pengambilan keputusan berbasis data spasial untuk mendukung distribusi pupuk subsidi yang lebih objektif dan transparan*

***Kata kunci*— sistem informasi geografis, evaluasi distribusi pupuk subsidi, klasterisasi, k-means, RAD, desa klapagading**

I. PENDAHULUAN

Distribusi pupuk bersubsidi merupakan kebijakan strategis pemerintah Indonesia dalam mendukung peningkatan produktivitas pertanian dan menjaga ketahanan pangan nasional. Program ini bertujuan menjamin ketersediaan pupuk dengan harga terjangkau bagi petani kecil sehingga keberlanjutan usaha tani dapat dipertahankan secara berkelanjutan [1], [2]. Meskipun demikian, implementasi kebijakan pupuk bersubsidi masih menghadapi berbagai kendala, antara lain ketidaktepatan sasaran penerima, ketimpangan distribusi antarwilayah, serta keterbatasan mekanisme evaluasi berbasis kondisi riil lahan pertanian [1], [3]. Permasalahan tersebut menunjukkan perlunya sistem evaluasi yang mampu memadukan data spasial dan karakteristik lahan secara objektif sebagai dasar pengambilan keputusan.

Sistem Informasi Geografis (SIG) telah banyak dimanfaatkan dalam pengelolaan sektor pertanian karena kemampuannya mengintegrasikan data lokasi dan atribut secara sistematis. Melalui SIG, informasi mengenai sebaran lahan, jenis tanah, dan tingkat produktivitas dapat divisualisasikan dalam bentuk peta digital yang mendukung analisis spasial [4], [5]. Pengembangan SIG berbasis web (Web GIS) memberikan keunggulan tambahan berupa kemudahan akses, interaktivitas, serta kemampuan pemantauan wilayah secara *real-time* [6]. Dalam konteks distribusi pupuk subsidi, visualisasi spasial menjadi penting untuk mengidentifikasi wilayah prioritas, memantau kesesuaian antara karakteristik lahan dan alokasi pupuk, serta meningkatkan transparansi kebijakan distribusi.

Di sisi lain, analisis klaster merupakan pendekatan data mining yang efektif untuk mengelompokkan objek berdasarkan tingkat kemiripan karakteristik tertentu. Algoritma *K-means* banyak digunakan karena kesederhanaan dan efisiensinya dalam mengolah data numerik berukuran besar [7], [8]. Dalam bidang pertanian, klasterisasi telah diterapkan untuk mengelompokkan lahan berdasarkan luas, produktivitas, dan kualitas tanah guna mendukung perencanaan produksi serta distribusi sarana pertanian [9], [10]. Penentuan jumlah klaster yang optimal umumnya dilakukan menggunakan metode *Elbow* dan dievaluasi melalui metrik validasi seperti *Silhouette*, *Davies–Bouldin*, dan *Calinski–Harabasz* untuk menjamin kualitas hasil pengelompokan [11].

Integrasi hasil klasterisasi ke dalam Web GIS memungkinkan analisis yang tidak hanya bersifat numerik, tetapi juga spasial. Hasil pengelompokan lahan dapat divisualisasikan langsung pada peta digital dengan pewarnaan berbeda untuk setiap klaster, sehingga pola persebaran kelompok lahan dapat diamati secara intuitif [9], [6]. Pendekatan ini memudahkan identifikasi wilayah dengan skala usaha kecil dan produktivitas rendah yang memerlukan prioritas bantuan, serta wilayah dengan skala besar dan produktivitas tinggi sebagai penyangga produksi pangan desa. Dengan demikian, analisis klaster berbasis spasial dapat

menjadi dasar evaluasi distribusi pupuk yang lebih objektif dan berbasis data.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem *Web Geographic Information System* untuk evaluasi distribusi pupuk subsidi berbasis klasterisasi skala usaha petani di Desa Klapagading. Sistem mengintegrasikan data luas lahan, produktivitas, dan jenis tanah menggunakan algoritma *K-means*, kemudian divisualisasikan dalam peta digital interaktif sebagai dasar analisis distribusi pupuk. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyediaan model evaluasi distribusi pupuk berbasis integrasi klasterisasi dan Web GIS yang diharapkan mampu meningkatkan ketepatan sasaran bantuan, mendukung pengambilan keputusan berbasis data, serta berkontribusi pada pengelolaan pertanian yang berkelanjutan

II. KAJIAN TEORI

Kajian teori disusun sebagai landasan ilmiah yang mendukung perumusan metode, perancangan sistem, serta analisis hasil penelitian. Bagian ini memuat tinjauan pustaka yang relevan sebagai dasar dalam memahami pendekatan yang digunakan dan memastikan bahwa penelitian disusun secara sistematis, terarah, dan dapat dipertanggungjawabkan secara akademik

A. Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan sistem berbasis komputer yang digunakan untuk mengelola, menganalisis, dan menampilkan data yang memiliki referensi lokasi di permukaan bumi. SIG terdiri atas komponen perangkat keras, perangkat lunak, data, metode, dan sumber daya manusia yang berperan dalam proses analisis spasial [12]. Dalam bidang pertanian, SIG dimanfaatkan untuk pengelolaan lahan, pemantauan kondisi tanaman, serta evaluasi distribusi pupuk secara spasial guna mendukung pengambilan keputusan berbasis lokasi [4].

B. Pupuk Subsidi

Pupuk subsidi merupakan kebijakan pemerintah berupa bantuan harga pupuk bagi petani kecil guna meningkatkan produktivitas pertanian dan menjaga ketahanan pangan nasional. Distribusi pupuk subsidi diatur melalui regulasi Kementerian Pertanian dan diarahkan kepada petani yang tergabung dalam kelompok tani [2]. Jenis pupuk subsidi utama meliputi pupuk urea sebagai sumber nitrogen dan pupuk NPK yang mengandung unsur hara makro nitrogen, fosfor, dan kalium, yang berperan penting dalam pertumbuhan dan hasil tanaman [2].

C. Klasterisasi

Klasterisasi merupakan teknik unsupervised learning yang bertujuan mengelompokkan data ke dalam beberapa kelompok berdasarkan kemiripan karakteristik tanpa menggunakan label kelas. Dalam sektor pertanian, klasterisasi digunakan untuk mengelompokkan lahan atau petani berdasarkan variabel produksi dan kebutuhan input guna mendukung perencanaan distribusi sumber daya yang lebih efisien [7]. Metode ini telah diterapkan pada pemetaan produksi pertanian berbasis SIG menggunakan algoritma K-Means dan K-Medoids [9], [7].

D. Algoritma K-Means

Algoritma *K-Means* merupakan metode klasterisasi berbasis jarak yang bertujuan mengelompokkan data ke dalam sejumlah klaster berdasarkan kedekatan terhadap pusat klaster (*centroid*). Proses klasterisasi dilakukan melalui iterasi yang meliputi inisialisasi *centroid*, pengelompokan data menggunakan jarak *Euclidean*, pembaruan centroid, dan penghentian iterasi ketika posisi centroid telah konvergen [13].

Jarak antara data ke-i dan centroid klaster ke-j dihitung menggunakan jarak *Euclidean* sebagai berikut:

$$d(x_i, c_j) = \sqrt{\sum_{m=1}^{M} (x_{im} - c_{jm})^2} \quad (1)$$

Setelah proses pengelompokan, posisi centroid diperbarui sebagai nilai rata-rata seluruh data dalam klaster:

$$dc_j = \frac{1}{|\ C_j\ |} \sum_{x_i \in C_j} x_i \quad (2)$$

Iterasi dilakukan hingga perubahan posisi centroid tidak signifikan atau jumlah iterasi maksimum tercapai, yang menandakan proses klasterisasi telah konvergen [7]

E. Standarisasi Data

Standarisasi data dilakukan untuk menyamakan skala antarvariabel agar setiap fitur memiliki kontribusi yang seimbang dalam proses klasterisasi. Tahapan ini penting pada metode berbasis jarak seperti *K-Means* karena perbedaan rentang nilai dapat menyebabkan dominasi variabel tertentu [14].

Metode yang digunakan adalah *Z-Score Standardization* dengan persamaan sebagai berikut:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (3)$$

dengan z_i merupakan nilai hasil standarisasi, x_i nilai data ke-i, $\bar{x}$ nilai rata-rata, dan $s$tandar deviasi. Proses ini menghasilkan data dengan nilai rata-rata nol dan standar deviasi satu sehingga meningkatkan stabilitas dan kecepatan konvergensi algoritma [14].

F. Penentuan Jumlah Klaster (Elbow Method)

Penentuan jumlah klaster optimal dilakukan menggunakan metode *Elbow* dengan memanfaatkan nilai *Within-Cluster Sum of Squares* (WCSS). WCSS merepresentasikan total kuadrat jarak data terhadap centroid dalam setiap klaster dan dirumuskan sebagai berikut:

$$CSS = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{n_k} (x_i - \mu_k)^2 \quad (4)$$

Nilai WCSS dihitung untuk berbagai jumlah klaster dan divisualisasikan dalam bentuk grafik. Titik tekukan (*elbow point*) pada grafik menunjukkan jumlah klaster optimal karena setelah titik tersebut penurunan WCSS tidak lagi signifikan [11].

G. Evaluasi Klaster

Evaluasi klaster bertujuan menilai kualitas hasil pengelompokan berdasarkan tingkat kepadatan dalam klaster dan keterpisahan antar-klaster. Metrik evaluasi internal yang umum digunakan meliputi *Silhouette Score*, *Calinski–Harabasz Index*, dan *Davies–Bouldin Index* [11]. Ketiga metrik tersebut digunakan untuk memastikan bahwa klaster terbentuk secara konsisten dan representatif terhadap karakteristik data spasial pertanian [11].

III. METODE

Bagian metode penelitian menjelaskan tahapan pelaksanaan penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Uraian meliputi perancangan alur penelitian, sumber dan pengolahan data, teknik analisis, serta implementasi sistem yang dikembangkan. Penyusunan metode dilakukan secara sistematis untuk memastikan bahwa proses penelitian dapat direplikasi dan hasil yang diperoleh memiliki validitas serta reliabilitas yang memadai.

A. Subjek dan Objek Penelitian

Subjek penelitian ini adalah Sistem Informasi Geografis (SIG) berbasis web yang dikembangkan sebagai media analisis spasial dan visualisasi data pertanian di Desa Klapagading. Sistem dirancang untuk mengintegrasikan data atribut lahan dengan informasi spasial serta mengimplementasikan algoritma klasterisasi sebagai dasar evaluasi distribusi pupuk subsidi.

Objek penelitian berupa lahan pertanian sawah di Desa Klapagading yang dianalisis berdasarkan karakteristik skala usaha tani dan kondisi lahan. Fokus penelitian diarahkan pada pengelompokan lahan berdasarkan luas, produktivitas, dan jenis tanah untuk mendukung evaluasi pemerataan distribusi pupuk subsidi secara berbasis data dan spasial.

B. Data dan Variabel Penelitian

Data yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara dengan ketua kelompok tani untuk memperoleh informasi jenis tanah, produktivitas, serta estimasi hasil panen. Data sekunder bersumber dari data Pajak Bumi dan Bangunan (PBB) Desa Klapagading tahun 2022 yang memuat informasi atribut lahan dan identitas petak sawah.

Dataset difilter berdasarkan jenis objek "sawah" dan dibatasi pada blok lahan yang memiliki data atribut dan geometri lengkap. Variabel utama yang digunakan dalam proses klasterisasi meliputi:

- luas sebagai representasi skala usaha tani,
- produktivitas sebagai indikator hasil produksi per satuan luas,
- jenis_tanah sebagai karakteristik fisik lahan.

Variabel lain seperti nop, nama, koordinat (lon, lat), dan polygon digunakan sebagai informasi pendukung untuk visualisasi spasial dan tidak dilibatkan dalam perhitungan klaster. Statistik dataset yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

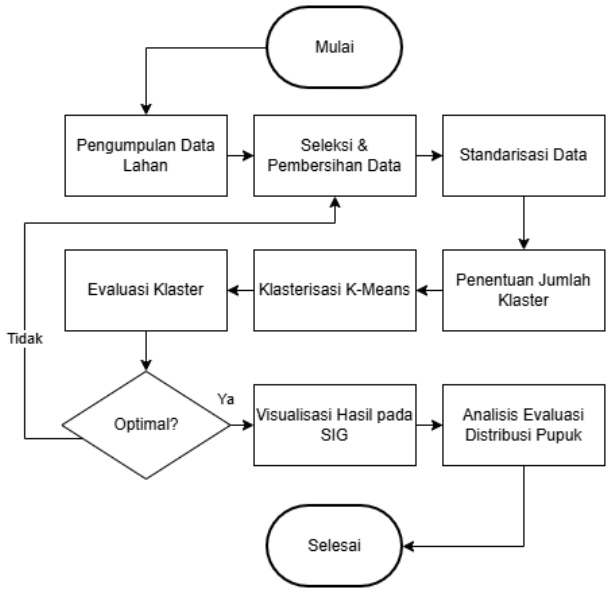
TABEL 1
(Statistik Dataset)

Variabel	N	Min	Max	Mean	Std	Std Error
Luas Lahan	911	91	14537	1583	1952	64.67
Produktivitas	911	2973	7033	4997	1659	54.98
Jenis Tanah	911	1	4	2.375	1.216	0.04

C. Alur Metodologi Penelitian

Alur metodologi penelitian disusun untuk menggambarkan tahapan utama dalam proses analisis dan pengembangan sistem. Tahapan dimulai dari pengumpulan dan seleksi data lahan pertanian, dilanjutkan dengan proses pra-pemrosesan data yang meliputi pembersihan data, penghapusan atribut tidak relevan, serta standarisasi data. Selanjutnya dilakukan penentuan jumlah klaster menggunakan *Elbow Method*, kemudian proses klasterisasi menggunakan algoritma *K-Means.*

Hasil klaster selanjutnya dievaluasi menggunakan metrik evaluasi internal, yaitu *Silhouette Score*, *Calinski–Harabasz Index*, dan *Davies–Bouldin Index*. Tahap akhir meliputi visualisasi hasil klaster pada Sistem Informasi Geografis serta analisis evaluasi distribusi pupuk subsidi berbasis klaster. Alur metodologi penelitian secara ringkas ditunjukkan pada Gambar 1.



GAMBAR 1
(Alur Penilitian)

D. Pra-Pemrosesan Data

Pra-pemrosesan data dilakukan untuk memastikan kualitas dan kesiapan data sebelum proses klasterisasi. Tahapan yang dilakukan meliputi pembersihan data, penghapusan atribut yang tidak relevan, penghapusan data duplikat berdasarkan NOP, serta penyaringan data berdasarkan jenis objek sawah.

Normalisasi data dilakukan menggunakan metode *Z-score standardization* terhadap variabel numerik luas dan produktivitas. Variabel jenis_tanah yang bersifat kategorikal ditransformasikan ke dalam bentuk numerik melalui proses *encoding* agar dapat digunakan dalam perhitungan jarak *Euclidean* pada algoritma *K-Means.*

E. Perancangan Model Klasterisasi

Proses klasterisasi dilakukan menggunakan algoritma *K-Means* dengan tiga variabel utama, yaitu luas, produktivitas,

dan jenis_tanah. Pemilihan variabel didasarkan pada relevansi terhadap skala usaha tani dan karakteristik lahan serta hasil analisis eksploratif awal.

Penentuan jumlah klaster dilakukan menggunakan *Elbow Method* dengan menganalisis perubahan nilai *Within-Cluster Sum of Squares* (WCSS). Hasil *Elbow Method* divalidasi menggunakan *Silhouette Score* untuk memastikan kualitas pemisahan klaster. Nilai jumlah klaster dipilih sebagai kompromi antara kualitas statistik dan kemudahan interpretasi dalam konteks kebijakan distribusi pupuk di tingkat desa.

Proses klasterisasi dilakukan secara iteratif hingga centroid konvergen. Hasil klaster divisualisasikan dalam ruang tiga dimensi berdasarkan ketiga variabel untuk membantu interpretasi pola sebaran data dan karakteristik masing-masing klaster.

F. Skema Evaluasi Alokasi Pupuk Berbasis Klaster

Hasil klasterisasi digunakan sebagai dasar evaluasi alokasi pupuk subsidi. Perhitungan dasar alokasi mengikuti aturan resmi, yaitu 275 kg/ha untuk pupuk urea dan 250 kg/ha untuk pupuk NPK. Selanjutnya diterapkan faktor penyesuaian berbasis klaster untuk merepresentasikan perbedaan kebutuhan relatif antar kelompok petani.

Klaster petani kecil atau berproduktivitas rendah diberikan faktor 1,10, klaster menengah faktor 1,00, dan klaster besar atau berproduktivitas tinggi faktor 0,90. Skema ini digunakan sebagai alat evaluatif untuk menilai kecukupan dan pemerataan alokasi pupuk, bukan sebagai pengganti kebijakan resmi dosis pemupukan.

G. Pengembangan Sistem dan Integrasi Model

Pengembangan sistem dilakukan menggunakan metode *Rapid Application Development* (RAD). Sistem dibangun dengan arsitektur terpisah antara aplikasi web berbasis *Laravel* dan layanan klasterisasi berbasis *Python–Flask*. Data spasial diolah menggunakan QGIS dan divisualisasikan menggunakan *Leaflet* dengan basemap *OpenStreetMap* dan *ESRI World Imagery*.

Model *K-Means* yang telah dilatih disimpan dalam bentuk file pickle dan diakses melalui *RESTful API Flask*. Aplikasi *Laravel* mengirimkan data lahan ke API untuk diproses dan menerima hasil klasterisasi dalam format JSON yang selanjutnya disimpan dan divisualisasikan pada peta SIG.

H. Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan menggunakan metode *Black Box Testing* untuk memastikan seluruh fungsi utama berjalan sesuai spesifikasi. Pengujian meliputi proses login, pengelolaan data lahan, impor data spasial, proses klasterisasi, serta visualisasi peta dan informasi lahan. Hasil pengujian digunakan untuk memastikan sistem siap digunakan sebagai media analisis dan evaluasi distribusi pupuk subsidi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil dan analisis proses klasterisasi lahan pertanian menggunakan algoritma *K-Means*. Tujuan utama analisis ini adalah untuk mengidentifikasi pengelompokan alami satuan lahan berdasarkan tiga parameter utama, yaitu luas lahan, produktivitas, dan jenis tanah, yang sebelumnya telah distandarisasi agar berada pada skala yang sebanding. Analisis ini bertujuan mengungkap pola karakteristik penggunaan lahan dan tingkat produktivitas pertanian di Desa Klapagading.

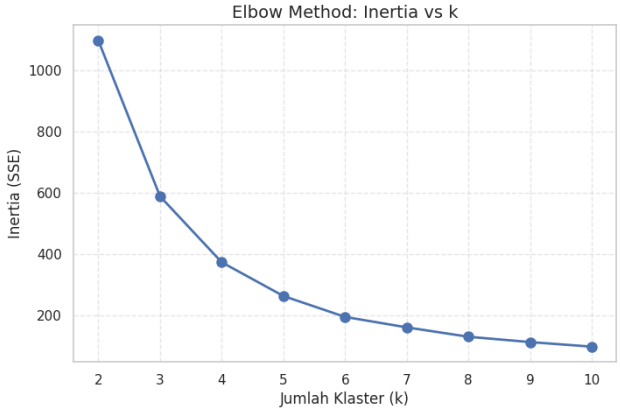
Pembahasan disusun dalam lima bagian. Pertama, penentuan jumlah klaster optimal berdasarkan beberapa metode evaluasi. Kedua, visualisasi dan interpretasi hasil klasterisasi untuk menggambarkan karakteristik masing-masing kelompok. Ketiga, perbandingan performa algoritma *K-Means* dengan beberapa algoritma klasterisasi lainnya. Keempat, integrasi hasil klasterisasi dalam sistem Web GIS. Kelima, implikasi hasil terhadap evaluasi distribusi pupuk subsidi dan pengelolaan lahan pertanian

A. Hasil Klasterisasi Menggunakan Algoritma K-Means

Proses klasterisasi dilakukan menggunakan algoritma *K-Means* terhadap tiga variabel yang telah distandarisasi, yaitu luas lahan, produktivitas, dan jenis tanah. Standarisasi dilakukan untuk memastikan bahwa setiap variabel memiliki kontribusi yang seimbang dalam proses pembentukan klaster. Hasil klasterisasi dianalisis menggunakan metrik kuantitatif serta visualisasi grafis guna memahami hubungan antara karakteristik lahan dan struktur klaster yang terbentuk.

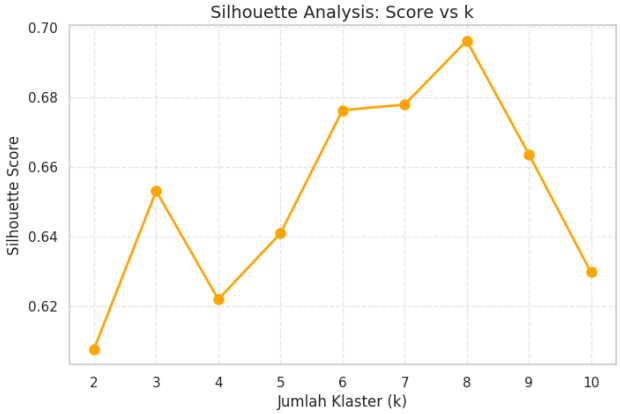
B. Penentuan Jumlah Klaster Optimal

Penentuan jumlah klaster optimal dilakukan dengan menggunakan pendekatan komparatif yang melibatkan metode Elbow, analisis *Silhouette*, serta dua indeks validasi internal, yaitu indeks *Calinski–Harabasz* (CH) dan indeks *Davies–Bouldin* (DB).



GAMBAR 2
(Metode *Elbow*)

Kurva Elbow menunjukkan penurunan nilai inertia yang signifikan pada transisi dari $k = 2$ ke $k = 3$. Penurunan tersebut mengindikasikan terjadinya pengurangan variansi dalam klaster secara substansial. Setelah $k = 3$, laju penurunan inertia menjadi semakin kecil, yang menunjukkan bahwa penambahan jumlah klaster memberikan peningkatan kualitas yang relatif terbatas. Titik belok pada $k = 3$ merepresentasikan keseimbangan antara kekompakan klaster dan kompleksitas model, sehingga jumlah klaster tersebut dipilih sebagai konfigurasi optimal.



GAMBAR 3
(Analisis Silhouette)

Analisis *Silhouette* memperlihatkan bahwa nilai tertinggi diperoleh pada $k = 8$, namun nilai pada $k = 3$ tetap berada pada tingkat yang tinggi dan stabil. Nilai *Silhouette* di atas 0,5 menunjukkan bahwa struktur klaster memiliki tingkat kohesi intra-klaster dan separasi antar-klaster yang baik. Meskipun jumlah klaster yang lebih besar dapat meningkatkan nilai *Silhouette*, konfigurasi tersebut cenderung menghasilkan klaster yang lebih terfragmentasi dan sulit diinterpretasikan. Oleh karena itu, k = 3 dipilih sebagai jumlah klaster yang paling seimbang antara ketepatan analisis dan kemudahan interpretasi. Perbandingan hasil evaluasi disajikan pada Tabel 2.

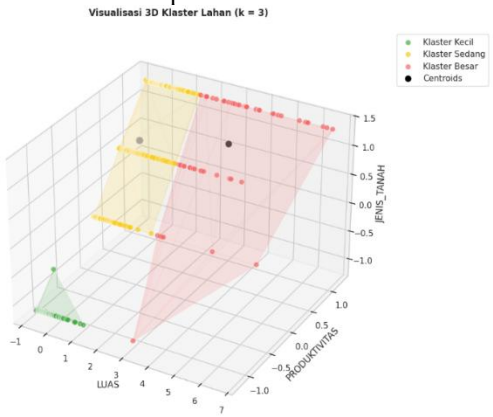
TABEL 2
(Perbandingan Metrix Validasi Klaster)

k	inertia	silhouette	CH	DB
2	1098	0.608	1353	0.612
3	589	0.653	1653	0.572
4	373	0.622	1911	0.629
5	263	0.641	2128	0.623
6	195	0.676	2361	0.596
7	160	0.678	2416	0.659
8	130	0.696	2589	0.593
9	112	0.664	2632	0.604
10	97	0.630	2711	0.652

Nilai *inertia* menunjukkan penurunan tajam dari $k = 2$ ke $k = 3$ dan kemudian menurun secara lebih lambat pada nilai k yang lebih besar. Pola ini menandakan bahwa manfaat penambahan klaster setelah $k = 3$ semakin berkurang. Nilai indeks CH pada $k = 3$ menunjukkan tingkat pemisahan klaster yang baik, sedangkan indeks DB mencapai nilai terendah pada konfigurasi yang sama, yang mengindikasikan klaster yang kompak dan terpisah dengan jelas.

Secara keseluruhan, kombinasi nilai *inertia* yang menurun signifikan, nilai *Silhouette* yang stabil, indeks CH yang tinggi, serta indeks DB yang rendah menunjukkan bahwa konfigurasi dengan $k = 3$ merupakan pilihan paling optimal untuk dataset yang digunakan

C. Visualisasi dan Interpretasi Klaster



GAMBAR 4
(Visualisasi 3D Hasil Klasterisasi)

Visualisasi tiga dimensi memperlihatkan pemisahan data yang jelas antar klaster dalam ruang fitur. Pola sebaran menunjukkan bahwa jenis tanah memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap tingkat produktivitas, sehingga membentuk lapisan-lapisan stratifikasi yang berbeda.
Berdasarkan hasil klasterisasi, satuan lahan dikelompokkan ke dalam tiga klaster dengan karakteristik sebagai berikut:

- Klaster 1 (Hijau): Lahan skala kecil dengan luas terbatas, produktivitas rendah, dan kualitas tanah kurang subur.
- Klaster 2 (Kuning): Lahan skala menengah dengan produktivitas sedang dan kondisi tanah yang relatif bervariasi, serta merupakan kelompok dominan.
- Klaster 3 (Merah): Lahan skala besar dengan produktivitas tinggi dan kualitas tanah yang baik, meskipun jumlahnya relatif sedikit.

TABEL 3
(Ringkasan Karakteristik Klaster)

Klaster	Jumlah lahan	Luas Min-Max	Productivitas mean	Jenis_tanah mean
1	343	104–3807	3001	1.000
2	511	91–4788	6178	3.176
3	57	4543–14537	6439	3.456

Klaster 1 merepresentasikan lahan-lahan kecil dengan potensi hasil yang rendah akibat keterbatasan luas dan kondisi tanah yang kurang mendukung. Klaster 2 menggambarkan sistem pertanian yang paling umum di wilayah penelitian, dengan keseimbangan antara luas lahan, produktivitas, dan kualitas tanah. Klaster 3 menunjukkan lahan-lahan unggulan dengan produktivitas tinggi dan kesesuaian tanah yang baik untuk budidaya intensif.

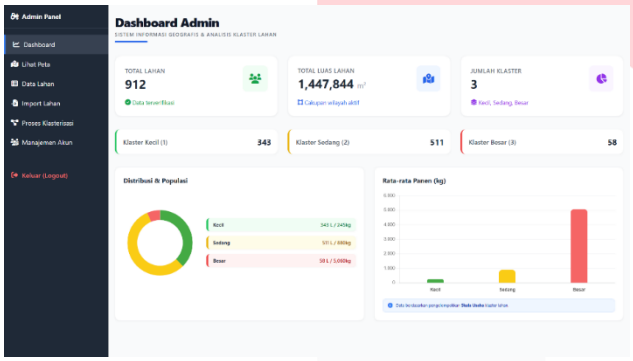
Hasil ini menunjukkan adanya korelasi positif antara luas lahan, kualitas tanah, dan produktivitas. Lahan yang lebih luas dengan tanah yang lebih subur cenderung menghasilkan produktivitas yang lebih tinggi, sedangkan lahan kecil dengan tanah kurang subur memiliki hasil yang lebih rendah.

D. Integrasi Hasil Klasterisasi dalam Sistem Web GIS

Hasil klasterisasi diintegrasikan ke dalam sistem *Web Geographic Information System* (Web GIS) untuk mendukung visualisasi spasial, pengelolaan data lahan, serta analisis distribusi pupuk secara interaktif. Sistem dirancang

berbasis web dengan antarmuka terstruktur yang terdiri atas empat modul utama, yaitu Dashboard Admin, Peta SIG, Manajemen Data Lahan, dan Modul Klasterisasi. Integrasi ini memungkinkan pengguna memantau kondisi lahan, mengelola data, serta menganalisis hasil pengelompokan secara terpadu dalam satu platform.

Selain implementasi fungsional, sistem juga melalui tahap pengujian untuk memastikan keandalan dan kesesuaian fungsi dengan kebutuhan pengguna. Pengujian dilakukan menggunakan pendekatan *black box testing* pada setiap modul utama untuk memverifikasi bahwa seluruh fitur, mulai dari autentikasi, pengelolaan data, proses klasterisasi, hingga visualisasi spasial, menghasilkan keluaran yang sesuai dengan skenario pengujian. Selanjutnya, dilakukan user acceptance testing untuk mengevaluasi aspek kemudahan penggunaan, kejelasan tampilan antarmuka, serta kesesuaian sistem dengan kebutuhan evaluasi distribusi pupuk subsidi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi dengan stabil, mudah digunakan, dan mampu mendukung proses analisis serta pengambilan keputusan secara efektif.



GAMBAR 5
(*Dashboard* Admin)

Gambar 5 menjelaskan bahwa setelah proses autentikasi berhasil, admin diarahkan ke halaman Dashboard yang berfungsi sebagai pusat kendali sistem. Dashboard menampilkan ringkasan informasi jumlah data lahan, distribusi klaster, serta status umum sistem. Selain itu, dashboard menyediakan akses cepat menuju modul utama, yaitu peta SIG, manajemen data lahan, dan proses klasterisasi. Penyajian informasi dalam bentuk ringkasan visual membantu admin memantau kondisi data secara menyeluruh serta mempercepat navigasi antar modul, sehingga mendukung pengelolaan sistem yang lebih efisien



GAMBAR 6
(Peta SIG)

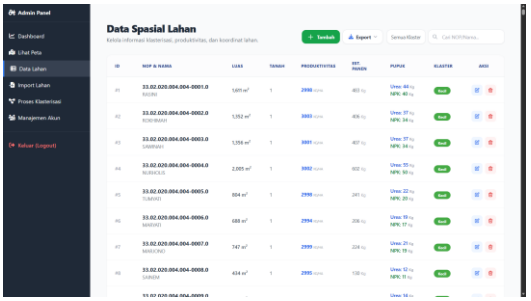
Gambar 6 menjelaskan bahwa modul Peta SIG menampilkan visualisasi spasial seluruh lahan pertanian dalam bentuk peta digital. Setiap satuan lahan direpresentasikan sebagai objek spasial yang diberi pewarnaan berbeda sesuai dengan hasil klasterisasi. Peta mendukung interaksi dasar seperti zoom, pan, serta pemilihan objek lahan untuk menampilkan informasi detail. Modul ini berfungsi sebagai media utama dalam pemantauan sebaran lahan dan distribusi klaster secara geografis, sehingga pengguna dapat mengidentifikasi pola spasial, konsentrasi klaster, serta wilayah dengan karakteristik lahan tertentu secara lebih komprehensif.

Berdasarkan visualisasi spasial pada peta SIG, terlihat adanya pola persebaran klaster yang tidak merata di seluruh wilayah Desa Klapagading. Wilayah bagian utara desa didominasi oleh Klaster 1 yang ditandai dengan warna hijau, merepresentasikan unit lahan skala kecil dengan tingkat produktivitas terendah. Konsentrasi klaster ini mengindikasikan bahwa wilayah utara memiliki keterbatasan sumber daya lahan, baik dari sisi luas maupun kualitas tanah. Rendahnya indeks kualitas tanah pada wilayah ini menjadi faktor pembatas utama yang berpengaruh terhadap hasil panen, sehingga wilayah utara memerlukan perhatian khusus dalam pengelolaan kesuburan tanah dan strategi peningkatan produktivitas.

Pada wilayah tengah hingga selatan desa, distribusi lahan mulai didominasi oleh Klaster 2 yang ditandai dengan warna kuning. Klaster ini merupakan kelompok terbesar dengan jumlah 511 unit lahan dan rata-rata produktivitas sebesar 6178 kg/ha. Sebaran Klaster 2 yang relatif merata menunjukkan bahwa wilayah ini memiliki kondisi lahan yang cukup stabil dan menjadi pusat aktivitas pertanian utama desa. Nilai indeks kualitas tanah yang lebih tinggi dibanding wilayah utara (3.176) mencerminkan daya dukung lingkungan yang lebih baik sehingga memungkinkan intensitas budidaya yang lebih tinggi dan hasil produksi yang lebih konsisten.

Sementara itu, Klaster 3 yang berwarna merah terkonsentrasi pada beberapa titik strategis di bagian selatan desa. Klaster ini mencakup 57 unit lahan dengan luas terbesar, produktivitas tertinggi, serta kualitas tanah paling optimal. Konsentrasi klaster unggulan pada wilayah selatan menunjukkan bahwa kawasan ini berperan sebagai sentra produksi utama desa dan memiliki potensi besar dalam menopang ketersediaan pangan lokal. Pola ini mengindikasikan adanya hubungan spasial yang kuat antara lokasi geografis, kesuburan tanah, skala usaha tani, dan tingkat produktivitas.

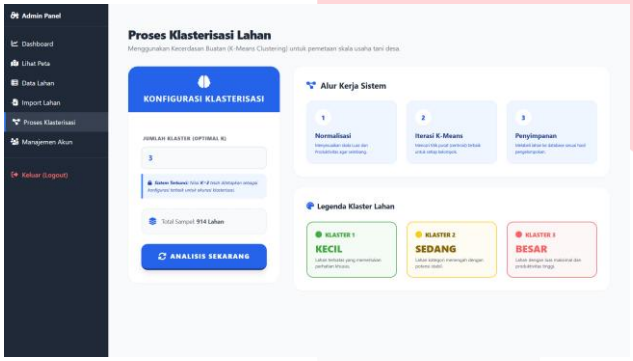
Secara keseluruhan, pola persebaran klaster pada peta SIG menunjukkan adanya gradasi kualitas lahan dari utara ke selatan desa. Analisis spasial ini memberikan informasi penting bagi perencanaan pertanian, khususnya dalam penentuan wilayah prioritas peningkatan produktivitas, perbaikan kualitas tanah, serta evaluasi kebijakan distribusi pupuk subsidi berbasis lokasi.



GAMBAR 7
(Peta SIG)

Gambar 7 menjelaskan bahwa modul manajemen data lahan menyediakan fungsi *Create, Read, Update*, dan *Delete* (CRUD) untuk pengelolaan data secara terstruktur. Data yang dikelola meliputi nomor objek pajak (NOP), identitas pemilik, luas lahan, jenis tanah, produktivitas, koordinat centroid, serta label klaster hasil pengelompokan. Sistem juga menyediakan fitur pencarian berdasarkan NOP atau nama pemilik serta filter berdasarkan kategori klaster.

Setiap entri data lahan dilengkapi dengan tombol untuk menampilkan visualisasi tiga dimensi (3D) sesuai dengan klaster masing-masing, sehingga memudahkan pengguna memahami posisi dan karakteristik lahan secara visual. Selain itu, sistem menyediakan fasilitas ekspor data dalam format CSV dan PDF untuk mendukung dokumentasi, pelaporan, dan analisis lanjutan. Modul ini berperan penting dalam menjaga konsistensi, keakuratan, dan keterbaruan data sebagai dasar proses analisis dan pengambilan keputusan.



GAMBAR 8
(Peta SIG)

Gambar 8 menjelaskan bahwa modul klasterisasi menyediakan antarmuka untuk menjalankan proses pengelompokan data lahan menggunakan algoritma *K-Means*. Pada modul ini disediakan tombol untuk memulai proses klasterisasi, di mana sistem menjalankan alur kerja mulai dari pengiriman data, proses standarisasi, pembentukan klaster, hingga penyimpanan hasil pengelompokan.

Halaman ini juga menampilkan ringkasan alur proses klasterisasi untuk membantu pengguna memahami tahapan yang sedang berlangsung, serta legenda klaster sebagai penjelas kategori hasil pengelompokan. Hasil klasterisasi divisualisasikan dalam bentuk grafik tiga dimensi yang menggambarkan penyebaran data berdasarkan parameter luas lahan, produktivitas, dan jenis tanah. Visualisasi ini memudahkan admin dalam menginterpretasikan struktur klaster, mengamati pola distribusi, serta mengidentifikasi kelompok lahan dengan karakteristik serupa secara lebih intuitif.

E. Implikasi Klasterisasi terhadap Evaluasi Distribusi Pupuk Subsidi

Integrasi modul dashboard, peta SIG, manajemen data, dan klasterisasi dalam satu sistem Web GIS memberikan dukungan yang komprehensif terhadap evaluasi distribusi pupuk subsidi. Informasi klaster memungkinkan identifikasi kelompok lahan dengan kebutuhan pupuk yang berbeda, sementara visualisasi spasial membantu menentukan lokasi prioritas secara geografis. Dengan demikian, sistem ini berfungsi sebagai alat pendukung pengambilan keputusan yang efektif dalam perencanaan alokasi pupuk, pemantauan produktivitas, serta pengelolaan lahan pertanian secara berkelanjutan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis klasterisasi dan integrasi sistem yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil mengelompokkan satuan lahan pertanian di Desa Klapagading ke dalam tiga klaster utama berdasarkan variabel luas lahan, produktivitas, dan jenis tanah. Penentuan jumlah klaster optimal dilakukan secara komprehensif menggunakan metode *Elbow*, analisis *Silhouette*, serta indeks *Calinski–Harabasz* dan *Davies–Bouldin*, yang secara konsisten menunjukkan bahwa konfigurasi $k = 3$ merupakan pilihan paling seimbang antara kualitas pemisahan klaster dan kemudahan interpretasi.

Hasil klasterisasi menunjukkan adanya perbedaan karakteristik yang jelas antar kelompok lahan. Klaster 1 merepresentasikan lahan skala kecil dengan produktivitas rendah dan kualitas tanah kurang subur, Klaster 2 menggambarkan lahan skala menengah yang dominan dengan produktivitas sedang dan kondisi tanah relatif stabil, sedangkan Klaster 3 menunjukkan lahan unggulan berskala besar dengan produktivitas tinggi dan kualitas tanah optimal. Pola ini mengindikasikan adanya hubungan positif antara luas lahan, kesuburan tanah, dan tingkat produktivitas, yang memperkuat relevansi variabel yang digunakan dalam proses klasterisasi.

Integrasi hasil klasterisasi ke dalam sistem Web GIS memungkinkan visualisasi spasial dan analisis distribusi lahan secara interaktif. Melalui peta SIG, terlihat pola gradasi kualitas lahan dari wilayah utara ke selatan desa, di mana wilayah selatan berperan sebagai sentra produksi utama. Modul manajemen data dan visualisasi tiga dimensi turut mendukung pemahaman struktur klaster serta mempermudah pengelolaan dan interpretasi data.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan mampu menyediakan informasi spasial dan nonspasial yang terintegrasi untuk mendukung evaluasi distribusi pupuk subsidi secara lebih objektif dan berbasis data. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan klasterisasi yang dikombinasikan dengan Web GIS berpotensi menjadi alat pendukung pengambilan keputusan yang efektif dalam perencanaan pertanian, penentuan wilayah prioritas, serta pengelolaan sumber daya lahan secara berkelanjutan

REFERENSI

[1] Kementerian Pertanian, *Statistik Pertanian 2023*. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2023. Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/22216

[2] C. Nasir, “Subsidized Fertilizer Policy in Indonesia: Legal Framework, Implementation Issues, and Reform Strategies Kebijakan Pupuk Bersubsidi di Indonesia: Kerangka Hukum, Permasalahan Implementasi, dan Strategi Reformasi,” Jurnal Hukum, 2025. [Online]. Available: https://journal.syamilahpublishing.com/index.php/mahkamah/

[3] N. Rahman Aulia and A.Md., *Kecamatan Wangon Dalam Angka 2023*. Badan Pusat Statistik Kabupaten Banyumas, 2023. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: https://banyumaskab.bps.go.id/id/publication/2023/09/26/5a7b8eb2d2930e633dee0949/kecamatan-wangon-dalam-angka-2023.html

[4] A. Muliawan Nur and A. Sudianto, "Pemetaan Lokasi Penjualan Pupuk Dan Obat-Obatan Pertanian Di Kabupaten Sumbawa Berbasis GIS (Geographic Information System)," *Jurnal Informatika dan Teknologi*, vol. 5, no. 2, p. 355, 2022, doi: 10.29408/jit.v5i2.5891.

[5] T. W. Lee and J. H. Walker, "Forests and Farmers: GIS Analysis of Forest Islands and Large Raised Fields in the Bolivian Amazon," *Land (Basel).*, vol. 11, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/land11050678.

[6] H. Zhao, L. Di, and Z. Sun, "WaterSmart-GIS: A Web Application of a Data Assimilation Model to Support Irrigation Research and Decision Making," *ISPRS Int. J. Geoinf.*, vol. 11, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/ijgi11050271.

[7] T. Santoso, A. Darmawan, N. Sari, M. A. F. Syadza, E. C. B. Himawan, and W. A. Rahman, "Clusterization of Agroforestry Farmers using K-Means Cluster Algorithm and Elbow Method," *Jurnal Sylva Lestari*, vol. 11, no. 1, pp. 107–122, Jan. 2023, doi: 10.23960/jsl.v11i1.646.

[8] Y. Li, X. Zhou, J. Gu, K. Guo, and W. Deng, "A Novel K-Means Clustering Method for Locating Urban Hotspots Based on Hybrid Heuristic Initialization," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/app12168047.

[9] N. Nurdin, R. Meiyanti, and M. Maulita, "Clustering and Mapping of Agricultural Production Based on Geographic Information System Using K-Medoids Algorithm," *Journal of Artificial Intelligence and Technology*, vol. 10, Feb. 2025, doi: 10.37965/jait.2025.0633.

[10] Saifulloh, Y. Yunitasari, and R. Dewi Welasih, "Mapping and Prediction Analysis of Rice Fertilizer Use in Paron District, Ngawi Regency using K-Means and Fuzzy Sugeno Methods," *IC-ITECHS*, Dec. 2024, doi: 10.32664/ic-itechs.v5i1.1600.

[11] I. Firman Ashari, E. Dwi Nugroho, R. Baraku, I. N. Yanda, and R. Liwardana, "Analysis of Elbow, Silhouette, Davies-Bouldin, Calinski-Harabasz, and Rand-Index Evaluation on K-Means Algorithm for Classifying Flood-Affected Areas in Jakarta," 2023. [Online]. Available: http://jurnal.polibatam.ac.id/index.php/JAIC

[12] T. H. Pamungkas, M. I. Yekti, and K. B. Warsana, "Optimising Flood Risk Reduction in Bali's Provincial Government Center through Cultural Philosophy Approach and GIS-based Conservation of Infiltration Wells," *Jurnal Presipitasi*, vol. 20, no. 3, pp. 740–754, 2023, doi: 10.14710/presipitasi.v20i3.740-754.

[13] H. Dikky Cahyo, H. Sri, and C. Totok, "K-Means Clustering Dalam Pengelompokan Relevansi," *JIPI (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika*, vol. 9, Jul. 2024, doi: 10.29100/jipi.v9i2.5507.

[14] R. Ramadhan Laska and A. Mudya Yolanda, "A Comparative Study of Z-Score and Min-Max Normalization for Rainfall Classification in Pekanbaru," 2024. [Online]. Available: http://ipublishing.intimal.edu.my/jods.html