Pemetaan Distribusi Hara Tanah Secara Spasial Pada Sentra Kentang Di Pulau Jawa

Muhammad Nabil Arifiandi Tambunan
Prodi S1 Teknik Fisika
Fakultas Teknik
Universitas Telkom
nabilarifiandi@student.telkomuniversity.ac.id

Dudi Darmawan
Prodi S1 Teknik Fisika
Fakultas Teknik
Universitas Telkom
DudiDDW@gmail.com

Iwan Cony Setiadi
Prodi S1 Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh November
Iwancony.setiadi@its.ac.id

Abstrak

Kentang (Solanum tuberosum L.) merupakan komoditas hortikultura strategis yang produktivitasnya sangat dipengaruhi kesuburan tanah dan kondisi lingkungan lahan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem analisis dan visualisasi spasial berbasis Geographic Information System (GIS) untuk memetakan distribusi unsur hara tanah, mengestimasi nilai hara pada lokasi tidak tersampel, serta mendukung evaluasi kesesuaian lahan budidaya kentang. Data diperoleh dari 179 titik pengamatan di 12 sentra produksi kentang di Pulau Jawa pada Juli–Agustus 2025, melalui pengukuran in-situ menggunakan sensor tanah dan uji laboratorium. Parameter yang dianalisis meliputi Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), pH tanah, koordinat lokasi, dan elevasi. Data sensor dikalibrasi menggunakan model Artificial Neural Network (ANN) dengan hasil laboratorium sebagai ground truth, sedangkan klasifikasi kesesuaian lahan juga memanfaatkan model ANN kolaboratif. Hasil menunjukkan Ordinary Kriging memberikan estimasi baik pada pH tanah dengan galat relatif di bawah 6,5%, sedangkan N, P, dan K memiliki galat lebih tinggi karena distribusinya lebih dinamis dan dipengaruhi faktor antropogenik, seperti pola pemupukan. Perbedaan elevasi juga tidak selalu berbanding lurus dengan galat prediksi. Hasil analisis diintegrasikan ke dashboard Web GIS interaktif sebagai data periodik untuk mendukung pertanian presisi yang efektif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Ordinary Kriging*, Sistem Informasi Geografis, Pertanian Presisi, Hara Tanah, Kentang, Web GIS.

Abstract

Potatoes (Solanum tuberosum L.) are a strategic horticultural commodity whose productivity is greatly influenced by soil fertility and land environmental conditions. This study aims to develop a Geographic Information System (GIS)-based spatial analysis and visualization system to map the distribution of soil nutrients, estimate nutrient levels at unsampled locations, and support the evaluation of land suitability for potato cultivation. Data were collected from 179 observation points across 12 potato production centers on the island of Java during July–August 2025, through in-situ measurements using soil sensors and laboratory tests. The analyzed parameters included nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), soil pH, location coordinates, and elevation. Sensor data were calibrated using an Artificial Neural Network (ANN) model with laboratory results as ground truth, while land suitability classification also utilized a collaborative ANN model. The results showed that Ordinary Kriging provided good estimates for soil pH with a relative error below 6.5%, whereas N, P, and K had higher errors due to their more dynamic distributions and the influence of anthropogenic factors, such as fertilization patterns. Elevation differences also do not always correlate directly with prediction errors. The analysis results are integrated into an interactive Web GIS dashboard as periodic data to support effective and sustainable precision agriculture.

Keywords: Ordinary Kriging, Geographic Information System, Precision Agriculture, Soil Nutrients, Potatoes, Web GIS

1. Pendahuluan

Kentang (Solanum tuberosum L.) merupakan salah satu komoditas pangan strategis global yang menempati peringkat keempat setelah padi, gandum, dan jagung [1]. Di tengah tantangan perubahan iklim dan kebutuhan peningkatan produktivitas pertanian, pemanfaatan teknologi geospasial semakin banyak digunakan untuk mendukung penerapan pertanian presisi. Badan pangan dunia seperti Food and Agriculture Organization (FAO) dan United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA) juga menekankan pentingnya teknologi geospasial sebagai salah satu pendekatan dalam mendukung pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya pada sektor pertanian [2], [3].

Tantangan lain dalam pemetaan hara tanah adalah masih terbatasnya penelitian yang berfokus pada skala halus di wilayah dengan kondisi geografis dan topografi yang kompleks, seperti sentra produksi kentang di Pulau Jawa [6], [7], [8]. Pulau Jawa memiliki beberapa wilayah dataran tinggi yang menjadi pusat budidaya kentang, dengan karakteristik tanah, elevasi, dan praktik budidaya yang berbeda-beda. Perbedaan kondisi tersebut menyebabkan distribusi unsur hara tanah tidak selalu seragam, sehingga diperlukan pendekatan spasial yang mampu menggambarkan variasi tersebut secara lebih detail.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan geospasial dua jalur (dual geospatial approach). Jalur pertama dilakukan melalui pemetaan spasial makroskopis unsur hara Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan pH pada 12 sentra produksi kentang utama di Pulau Jawa menggunakan metode IDW. Jalur kedua difokuskan pada pemodelan mikroskopis

menggunakan metode Ordinary Kriging yang diuji pada lima titik sentra di Dataran Tinggi Dieng. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran distribusi hara secara regional sekaligus mengevaluasi kemampuan model geostatistik dalam mengestimasi nilai hara pada area yang tidak tersampel secara langsung.

Penelitian ini juga dilaksanakan dalam kerangka kolaboratif. Data parameter hara yang digunakan merupakan hasil pengukuran sensor yang telah melalui proses kalibrasi menggunakan model Artificial Neural Network (ANN) yang dikembangkan oleh rekan tim penelitian [9], [10]. Model kalibrasi tersebut digunakan untuk menyesuaikan hasil pembacaan sensor dengan data acuan dari hasil analisis laboratorium. Data hara yang telah terkalibrasi kemudian digunakan sebagai masukan utama (upstream input) dalam pemodelan spasial pada penelitian ini. Selanjutnya, keandalan hasil estimasi Ordinary Kriging dievaluasi menggunakan metode Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) dengan metrik Mean Absolute Error (MAE) dan Normalized Mean Absolute Error (NMAE) [11].

Selain pemetaan distribusi hara, informasi spasial tersebut juga perlu dikaitkan dengan evaluasi kesesuaian lahan agar dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan budidaya. Selama ini, evaluasi kesesuaian lahan sering dilakukan berdasarkan batasan fisik tertentu, seperti elevasi dan derajat keasaman (pH) tanah [12], [13]. Namun, dalam konteks spasial, lokasi yang berdekatan umumnya memiliki karakteristik yang relatif lebih mirip dibandingkan lokasi yang berjauhan, sebagaimana dijelaskan dalam Hukum Pertama Geografi Tobler [14]. Oleh karena itu, evaluasi kesesuaian lahan tidak hanya perlu mempertimbangkan batasan agronomis, tetapi juga hubungan spasial antar titik pengamatan.

Untuk mendukung proses evaluasi tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem inferensi kesesuaian lahan berbasis Decision Tree yang diintegrasikan dengan hasil interpolasi Ordinary Kriging. Sistem ini dirancang dengan mempertimbangkan homogenitas spasial dari titik-titik tetangga terdekat, kemudian menggunakan parameter agronomis seperti elevasi dan pH sebagai aturan tambahan apabila titik uji menunjukkan kondisi yang berbeda dari lingkungan sekitarnya. Dengan pendekatan ini, proses klasifikasi kesesuaian lahan diharapkan dapat dilakukan secara lebih adaptif terhadap kondisi spasial di lapangan.

Agar hasil analisis dapat disajikan secara lebih informatif dan mudah diakses, seluruh proses pemetaan dan pemodelan diintegrasikan ke dalam dashboard Web-Based Geographic Information System (GIS) interaktif. Dashboard ini dirancang untuk menampilkan distribusi hara, hasil estimasi geostatistik, serta zonasi kesesuaian lahan secara digital. Selain itu, aspek visual pada sistem juga dirancang dengan mempertimbangkan prinsip Color Universal Design (CUD), sehingga informasi pada peta dapat lebih mudah dibaca oleh pengguna dengan berbagai kondisi penglihatan warna [15].

Penelitian ini juga mempertimbangkan pengaruh perbedaan elevasi vertikal (ΔH) terhadap galat prediksi spasial. Pada wilayah dataran tinggi, perbedaan elevasi dapat memengaruhi aliran permukaan dan berpotensi menyebabkan pencucian hara (leaching). Namun, pada lahan pertanian, distribusi unsur hara juga dapat dipengaruhi oleh aktivitas manusia, terutama perbedaan dosis, jenis, dan waktu pemupukan antar lahan. Oleh karena itu, penelitian ini turut menganalisis hubungan antara ΔH dan galat prediksi untuk melihat apakah variasi hara tanah lebih dipengaruhi oleh faktor topografi atau oleh intervensi antropogenik dalam pengelolaan lahan.

Inovasi utama dalam penelitian ini dibangun melalui kerangka kolaboratif. Akuisisi parameter hara secara *near real-time* didapatkan melalui model kalibrasi *Artificial Neural Network* (ANN) yang dikembangkan oleh rekan tim penelitian [9, 10]. Data hara terkalibrasi inilah yang kemudian menjadi input hulu (*upstream input*) bagi komputasi *Ordinary Kriging* di penelitian ini, yang dievaluasi keandalannya menggunakan teknik *Leave One Out Cross Validation* (LOOCV) dengan metrik *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Normalized* MAE (NMAE) [11].

2. Metode Penelitian

2.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-komputasional berbasis analisis spasial untuk memetakan distribusi unsur hara tanah dan mendukung evaluasi kesesuaian lahan budidaya kentang. Secara umum, penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pengambilan data lapangan, kalibrasi data sensor, pengolahan data spasial, estimasi geostatistik, evaluasi hasil prediksi, klasifikasi kesesuaian lahan, serta penyajian hasil dalam dashboard berbasis Geographic Information System (GIS).

Objek penelitian berupa lahan sentra produksi kentang di Pulau Jawa. Parameter utama yang dianalisis meliputi Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), pH tanah, koordinat lokasi, dan elevasi. Hasil akhir penelitian berupa sistem visualisasi spasial yang menampilkan distribusi hara tanah, hasil estimasi parameter tanah pada lokasi tidak tersampel, serta informasi kesesuaian lahan secara digital.

2.2. Waktu, Lokasi, dan Sumber Data

Pengambilan data lapangan dilakukan pada periode Juli–Agustus 2025 di 12 sentra produksi kentang yang tersebar di Pulau Jawa. Data penelitian diperoleh dari 179 titik pengamatan yang merepresentasikan variasi kondisi lahan pada masing-masing wilayah. Oleh karena itu, data yang digunakan dalam sistem menggambarkan kondisi hara tanah dan lingkungan lahan pada periode pengambilan data tersebut, bukan data yang bersifat real-time.

Sumber data dalam penelitian ini terdiri atas data primer hasil pengukuran langsung di lapangan dan data hasil uji laboratorium. Data primer diperoleh melalui pengukuran in-situ menggunakan sensor tanah portabel dan perangkat Global Positioning System (GPS). Sementara itu, data laboratorium digunakan sebagai data acuan atau ground truth untuk proses kalibrasi hasil pembacaan sensor.

2.3. Prosedur Perolehan dan Kalibrasi Data

Proses perolehan data dilakukan dengan mengukur parameter tanah pada titik-titik pengamatan yang telah ditentukan. Pengukuran lapangan dilakukan menggunakan sensor tanah untuk memperoleh nilai parameter hara dan karakteristik tanah, seperti N, P, K, pH, serta parameter pendukung lainnya. Informasi koordinat dan elevasi diperoleh menggunakan GPS agar setiap data pengukuran memiliki referensi spasial.

Data hasil pembacaan sensor kemudian dikalibrasi menggunakan model Artificial Neural Network (ANN) yang dikembangkan dalam penelitian kolaboratif. Model ANN digunakan untuk mempelajari hubungan antara hasil pembacaan sensor dan hasil uji laboratorium. Proses kalibrasi ini bertujuan untuk meningkatkan kesesuaian nilai sensor terhadap data acuan, sehingga data yang digunakan dalam analisis spasial menjadi lebih representatif.

2.4. Analisis Spasial dan Estimasi Geostatistik

Data hasil kalibrasi digunakan sebagai masukan dalam analisis spasial berbasis GIS. Pada skala regional, data dari 12 sentra produksi kentang divisualisasikan untuk menggambarkan pola sebaran hara tanah di Pulau Jawa. Visualisasi ini bertujuan untuk memperlihatkan variasi kandungan N, P, K, dan pH tanah antarwilayah pengamatan.

Pada skala mikro, penelitian ini menggunakan metode Ordinary Kriging untuk mengestimasi nilai parameter tanah pada lokasi yang tidak tersampel secara langsung. Pemodelan dilakukan pada lima titik sentra di Dataran Tinggi Dieng, yaitu Kepakisan, Bakal, Sikunang, Dieng Kulon, dan Karangtengah. Ordinary Kriging dipilih karena mampu mempertimbangkan hubungan spasial antar titik pengamatan melalui fungsi semivariogram.

Estimasi nilai parameter tanah pada lokasi target dinyatakan sebagai kombinasi linier dari nilai titik pengamatan di sekitarnya, sebagaimana ditunjukkan pada (1).

$$Z^*(s_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

dengan $(Z^*(S_0))$ merupakan nilai estimasi pada lokasi target, $(Z(S_i))$ merupakan nilai parameter tanah pada titik pengamatan ke-(i), (λ_i) merupakan bobot Kriging, dan (n) merupakan jumlah titik pengamatan yang digunakan. Agar hasil estimasi tidak bias, jumlah bobot Kriging harus memenuhi syarat pada (2).

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \quad (2)$$

2.5. Evaluasi Hasil Estimasi

Evaluasi hasil estimasi dilakukan menggunakan metode *Leave-One-Out Cross-Validation* (LOOCV). Pada metode ini, satu titik pengamatan dikeluarkan sementara dari kumpulan data dan diperlakukan sebagai titik uji, sedangkan titik lainnya digunakan sebagai data acuan untuk melakukan estimasi. Nilai hasil estimasi kemudian dibandingkan dengan nilai aktual pada titik tersebut.

Tingkat galat prediksi dihitung menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Normalized Mean Absolute Error* (NMAE). MAE digunakan untuk menghitung rata-rata selisih absolut antara nilai aktual dan nilai prediksi, sedangkan NMAE digunakan untuk menunjukkan galat relatif dalam bentuk persentase. Perhitungan MAE dan NMAE ditunjukkan pada (3).

$$NMAE = \frac{MAE}{\bar{Y}} \; x \; 100\% \quad (3)$$

Dengan (n) merupakan jumlah data uji, dan $(\bar{Y})$ merupakan rata-rata nilai aktual. Selain evaluasi galat, penelitian ini juga menganalisis hubungan antara selisih elevasi vertikal dan galat prediksi untuk melihat pengaruh topografi terhadap hasil estimasi spasial.

2.5. Klasifikasi Kesesuaian Lahan dan Implementasi Web GIS

Hasil estimasi Ordinary Kriging selanjutnya diintegrasikan dengan proses evaluasi kesesuaian lahan. Klasifikasi kesesuaian lahan memanfaatkan hasil model ANN kesesuaian lahan dari penelitian kolaboratif dan didukung oleh sistem inferensi berbasis Decision Tree. Parameter yang dipertimbangkan dalam proses klasifikasi meliputi hara tanah, pH, elevasi, serta hubungan spasial antar titik pengamatan. Kategori kesesuaian lahan yang digunakan terdiri atas cocok, netral, dan tidak cocok.

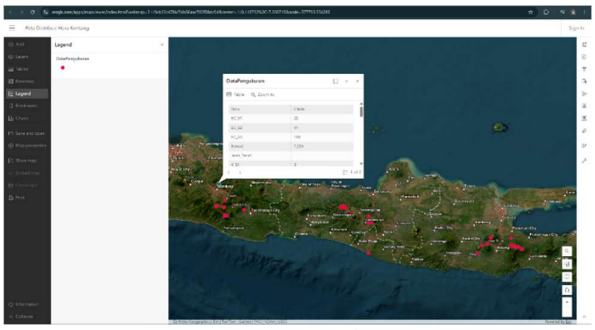
Tahap akhir penelitian adalah mengembangkan dashboard Web-Based Geographic Information System (Web GIS) untuk menyajikan hasil analisis secara interaktif. Dashboard ini menampilkan peta distribusi hara tanah, hasil estimasi Ordinary Kriging, nilai galat prediksi, serta zonasi kesesuaian lahan. Sistem yang dikembangkan berfungsi sebagai media visualisasi dan alat bantu analisis spasial untuk mendukung penerapan pertanian presisi pada budidaya kentang.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Hasil Pemetaan Spasial Data Pengamatan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa data pengamatan berhasil divisualisasikan secara spasial pada 12 sentra produksi kentang di Pulau Jawa. Data yang digunakan berasal dari 179 titik pengamatan yang diperoleh melalui pengukuran langsung di lapangan pada periode Juli–Agustus 2025. Setiap titik pengamatan memiliki informasi koordinat, elevasi, serta parameter tanah berupa Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K), dan pH tanah.

Visualisasi spasial dilakukan menggunakan pendekatan *Geographic Information System* (GIS) untuk menampilkan sebaran titik pengamatan dan distribusi parameter tanah secara digital. Hasil pemetaan menunjukkan bahwa sebagian besar titik pengamatan berada pada wilayah dataran tinggi, yang secara umum sesuai dengan karakteristik lingkungan tumbuh tanaman kentang. Sebaran titik ini menjadi dasar dalam analisis spasial lanjutan, terutama untuk melihat variasi hara tanah antarwilayah serta menentukan lokasi yang digunakan dalam proses estimasi geostatistik.



GAMBAR 1

Visualisasi sebaran titik pengamatan pada 12 sentra produksi kentang di Pulau Jawa menggunakan *Geographic Information System* (GIS).

Berdasarkan Gambar 1, distribusi titik pengamatan menunjukkan bahwa data memiliki cakupan spasial yang cukup luas untuk menggambarkan kondisi umum sentra produksi kentang di Pulau Jawa. Namun, variasi kondisi geografis dan pengelolaan lahan antarwilayah tetap berpotensi menyebabkan perbedaan karakteristik hara tanah. Oleh karena itu, diperlukan analisis lanjutan untuk mengestimasi nilai parameter tanah pada lokasi yang tidak tersampel secara langsung.

3.2. Hasil Implementasi Ordinary Kriging

Estimasi parameter tanah pada lokasi tidak tersampel dilakukan menggunakan metode Ordinary Kriging. Metode ini diterapkan pada lima titik uji di Dataran Tinggi Dieng, yaitu Kepakisan, Bakal, Dieng Kulon, Sikunang, dan Karangtengah. Parameter yang diuji meliputi N, P, K, dan pH tanah.

Ordinary Kriging digunakan karena mampu mempertimbangkan hubungan spasial antar titik pengamatan melalui semivariogram. Dalam sistem yang dikembangkan, setiap parameter tanah diproses secara terpisah karena memiliki karakteristik sebaran yang berbeda. Parameter pH cenderung lebih stabil, sedangkan unsur hara makro seperti N, P, dan K lebih dinamis karena dipengaruhi oleh aktivitas budidaya, terutama pola dan intensitas pemupukan.



GAMBAR 2
Tampilan dashboard Web-Based Geographic Information System untuk proses estimasi parameter tanah menggunakan Ordinary Kriging.

Berdasarkan Gambar 2, sistem yang dikembangkan mampu menampilkan lokasi titik uji, titik acuan di sekitar target, nilai aktual, nilai prediksi, elevasi, serta galat hasil estimasi. Penyajian hasil dalam bentuk peta dan tabel membantu proses interpretasi karena pengguna dapat memahami hasil estimasi secara visual dan numerik.

3.3. Evaluasi Akurasi Model Spasial

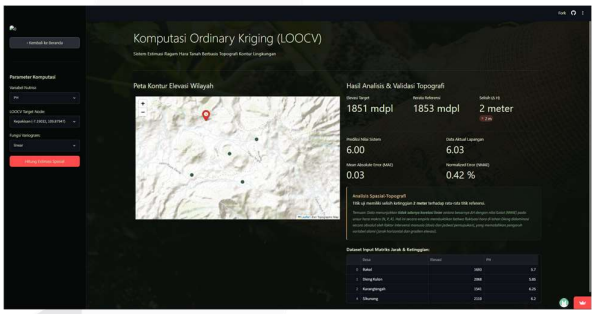
Evaluasi akurasi dilakukan menggunakan metode *Leave-One-Out Cross-Validation* (LOOCV). Pada metode ini, satu titik pengamatan dikeluarkan sebagai titik uji, sedangkan titik lainnya digunakan sebagai data acuan untuk melakukan estimasi. Nilai hasil estimasi kemudian dibandingkan dengan nilai aktual untuk memperoleh tingkat galat prediksi.

TABEL 1
Hasil pengujian akurasi LOOCV dan metrik topografi

Titik Desa Uji	Elevasi	Rata-Rata Elevasi Acuan	Selisih Ketinggian (ΔH)	Error Nitrogen (N)	Error Fosfor (P)	Error Kalium (K)	Error Keasaman (pH)
Kepakisan	1851 mdpl	1849 mdpl	2 m	44.12 %	30.46 %	29.70 %	0.42 %
Bakal	1693 mdpl	1893 mdpl	200 m	22.06 %	32.56 %	25.71 %	6.35 %
Dieng Kulon	2068 mdpl	1799 mdpl	269 m	79.64 %	74.58 %	76.68 %	3.41 %
Sikunang	2110 mdpl	1788 mdpl	322 m	29.41 %	46.22 %	45.21 %	4.06 %
Karangtengah	1541 mdpl	1931 mdpl	390 m	22.06 %	30.46 %	27.48 %	5.10 %

Berdasarkan Tabel 1, parameter pH memiliki nilai galat yang relatif rendah dibandingkan dengan parameter N, P, dan K. Nilai error pH berada pada rentang 0,42% hingga 6,35%, dengan rata-rata sekitar 3,87%. Hasil ini menunjukkan bahwa Ordinary Kriging mampu memberikan estimasi yang cukup baik untuk parameter pH tanah. Hal ini dapat terjadi karena pH tanah umumnya memiliki pola perubahan yang lebih stabil dan tidak berubah secara cepat dalam jangka pendek.

Sebaliknya, parameter N, P, dan K menunjukkan nilai galat yang lebih tinggi. Rata-rata error N sebesar sekitar 39,46%, P sebesar 42,86%, dan K sebesar 40,96%. Nilai galat tertinggi ditemukan pada titik Dieng Kulon, yaitu 79,64% untuk N, 74,58% untuk P, dan 76,68% untuk K. Tingginya galat pada unsur hara makro tersebut menunjukkan bahwa distribusi N, P, dan K lebih dinamis dibandingkan pH tanah.



GAMBAR 3
Hasil pengujian LOOCV pada titik Kepakisan untuk parameter pH dengan nilai galat terendah.

Hasil pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa estimasi pH pada titik Kepakisan memiliki galat yang sangat rendah, yaitu 0,42%. Temuan ini menunjukkan bahwa metode Ordinary Kriging dapat bekerja dengan baik apabila parameter yang diestimasi memiliki pola spasial yang relatif stabil.



GAMBAR 4

Hasil pengujian LOOCV pada titik Dieng Kulon untuk parameter Nitrogen dengan nilai galat tertinggi.

Sebaliknya, Gambar 4 menunjukkan bahwa parameter Nitrogen pada titik Dieng Kulon memiliki galat yang tinggi. Kondisi ini dapat disebabkan oleh variasi lokal yang tidak sepenuhnya dijelaskan oleh jarak spasial antar titik. Pada lahan pertanian, kandungan N, P, dan K sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia, seperti perbedaan dosis pupuk, waktu pemupukan, jenis pupuk, intensitas budidaya, serta kondisi pengelolaan lahan masing-masing petani. Oleh karena itu, dua lokasi yang berdekatan secara geografis belum tentu memiliki kandungan hara makro yang serupa.

Selain itu, hasil evaluasi menunjukkan bahwa perbedaan elevasi tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan galat prediksi. Sebagai contoh, Karangtengah memiliki selisih elevasi terbesar, yaitu 390 m, tetapi error Nitrogen hanya sebesar 22,06%. Sebaliknya, Dieng Kulon memiliki selisih elevasi 269 m, tetapi error Nitrogen mencapai 79,64%. Hal ini menunjukkan bahwa elevasi bukan satu-satunya faktor yang memengaruhi akurasi estimasi spasial. Faktor antropogenik, karakteristik tanah lokal, dan riwayat pengelolaan lahan juga berperan penting terhadap variasi kandungan hara tanah.

Secara umum, hasil evaluasi menunjukkan bahwa Ordinary Kriging lebih sesuai digunakan untuk parameter tanah yang memiliki pola sebaran relatif stabil, seperti pH. Untuk parameter hara makro yang lebih dinamis, metode ini masih dapat digunakan sebagai pendekatan estimasi awal, tetapi perlu didukung oleh variabel tambahan agar hasil prediksi menjadi lebih akurat.

3.4. Hasil Klasifikasi Kesesuaian Lahan

Hasil interpolasi Ordinary Kriging kemudian diintegrasikan dengan sistem inferensi berbasis Decision Tree untuk mendukung proses klasifikasi kesesuaian lahan. Sistem ini mempertimbangkan parameter N, P, K, pH, elevasi, serta hubungan spasial antar titik pengamatan. Klasifikasi dilakukan untuk menentukan status lahan ke dalam kategori cocok, netral, atau tidak cocok.

TABEL 2
Hasil pemrosesan aturan Decision Tree pada titik uji

Titik Uji Target (Desa)	Parameter Evaluasi	Profil Batas Rentang Fisik (Spatial Range)	Cabang Aturan (Rules Branch) yang Aktif	Keputusan Akhir Lahan
Kepakisan	N, P, K, pH	Di Dalam Rentang Acuan	Evaluasi Rentang Spasial (Spatial Range Check)	COCOK
Bakal	N, P, K, pH	Di Luar Rentang Acuan	Asersi Autokorelasi Spasial Absolut (Hukum Tobler)	COCOK
Sikunang	N, P, K, pH	Di Dalam Rentang Acuan	Evaluasi Rentang Spasial (Spatial Range Check)	COCOK
Dieng Kulon	N, P, K, pH	Di Luar Rentang Acuan	Asersi Autokorelasi Spasial Absolut (Hukum Tobler)	COCOK
Karangtengah	N, P, K, pH	Di Luar Rentang Acuan	Asersi Autokorelasi Spasial Absolut (Hukum Tobler)	COCOK

Berdasarkan Tabel 2, seluruh titik uji pada lima lokasi di Dataran Tinggi Dieng diklasifikasikan ke dalam kategori cocok. Pada titik Kepakisan dan Sikunang, nilai parameter tanah masih berada dalam rentang acuan titik-titik di sekitarnya, sehingga sistem memberikan keputusan cocok melalui evaluasi rentang spasial. Sementara itu, pada titik Bakal, Dieng Kulon, dan Karangtengah, terdapat parameter yang berada di luar rentang acuan, tetapi lokasi tersebut tetap diklasifikasikan cocok berdasarkan prinsip autokorelasi spasial.

Prinsip autokorelasi spasial mengacu pada kecenderungan bahwa lokasi yang berdekatan memiliki karakteristik yang lebih mirip dibandingkan lokasi yang berjauhan. Dengan demikian, apabila titik target berada di sekitar titik-titik acuan yang secara umum memiliki status sesuai, maka sistem dapat memberikan keputusan yang tetap mempertimbangkan konteks spasial. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi Ordinary Kriging dan Decision Tree dapat memberikan pendekatan yang lebih adaptif dalam evaluasi kesesuaian lahan.

3.5. Pembahasan Umum dan Generalisasi Temuan

Berdasarkan hasil penelitian, sistem yang dikembangkan mampu menyajikan informasi distribusi hara tanah, hasil estimasi geostatistik, nilai galat prediksi, dan klasifikasi kesesuaian lahan dalam bentuk dashboard Web-Based Geographic Information System (Web GIS). Sistem ini dapat membantu proses analisis spasial karena hasil pengukuran tanah tidak hanya ditampilkan sebagai data numerik, tetapi juga divisualisasikan dalam bentuk peta interaktif.

Temuan utama dari penelitian ini adalah bahwa tingkat keberhasilan estimasi spasial dipengaruhi oleh karakteristik parameter tanah yang dianalisis. Parameter pH menunjukkan hasil estimasi yang lebih baik karena memiliki pola perubahan yang cenderung stabil. Sementara itu, parameter N, P, dan K memiliki galat yang lebih tinggi karena lebih mudah berubah akibat aktivitas budidaya dan pengelolaan lahan.

Generalisasi yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah bahwa metode geostatistik seperti Ordinary Kriging efektif digunakan untuk pemetaan parameter tanah yang memiliki keteraturan spasial yang cukup kuat. Namun, untuk parameter yang sangat dipengaruhi aktivitas manusia, metode interpolasi berbasis jarak dan autokorelasi spasial perlu dikombinasikan dengan variabel tambahan, seperti riwayat pemupukan, jenis tanah, curah hujan, kemiringan lereng, dan pola penggunaan lahan.

Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat berperan sebagai alat bantu dalam mendukung pertanian presisi, khususnya untuk memberikan gambaran awal mengenai kondisi hara tanah dan kesesuaian lahan budidaya kentang. Namun, hasil sistem tetap perlu dipahami sebagai representasi kondisi lahan pada periode pengambilan data, bukan sebagai data pemantauan waktu nyata.

3.6. Pengembangan Penelitian ke Depan

Penelitian ini masih memiliki beberapa peluang pengembangan. Pertama, jumlah dan kerapatan titik pengamatan dapat ditingkatkan agar model interpolasi mampu merepresentasikan variasi spasial tanah dengan lebih baik. Penambahan titik sampel juga dapat membantu membentuk model semivariogram yang lebih stabil.

Kedua, penelitian selanjutnya dapat membandingkan beberapa metode interpolasi lain, seperti Inverse Distance Weighting (IDW), Co-Kriging, atau Regression Kriging. Perbandingan tersebut diperlukan untuk mengetahui metode yang paling sesuai dalam mengestimasi unsur hara makro yang memiliki variasi tinggi.

Ketiga, model prediksi dapat dikembangkan dengan menambahkan variabel pendukung, seperti kemiringan lereng, curah hujan, suhu, kelembapan, jenis tanah, tekstur tanah, Kapasitas Tukar Kation (KTK), C-organik, dan riwayat pemupukan. Penambahan variabel tersebut berpotensi meningkatkan akurasi estimasi, terutama untuk parameter N, P, dan K.

Keempat, sistem Web GIS dapat dikembangkan menjadi sistem pemantauan berkala dengan pembaruan data secara periodik. Dengan adanya data deret waktu, sistem dapat digunakan untuk menganalisis perubahan hara tanah sebelum dan sesudah pemupukan atau selama siklus budidaya kentang. Pengembangan ini akan membuat sistem lebih relevan untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pertanian presisi secara berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, sistem pemetaan spasial berbasis Geographic Information System (GIS) berhasil dikembangkan untuk memvisualisasikan distribusi unsur hara tanah pada sentra produksi kentang di Pulau Jawa. Data yang digunakan berasal dari 179 titik pengamatan yang dikumpulkan pada periode Juli–Agustus 2025 dan telah melalui proses kalibrasi menggunakan model Artificial Neural Network (ANN) dengan data laboratorium sebagai acuan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Ordinary Kriging dapat digunakan untuk mengestimasi nilai parameter tanah pada lokasi yang tidak tersampel secara langsung, terutama pada parameter pH tanah yang memiliki galat relatif rendah, yaitu di bawah 6,5%. Sementara itu, parameter unsur hara makro berupa Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) menunjukkan nilai galat yang lebih tinggi karena distribusinya lebih dinamis dan dipengaruhi oleh aktivitas budidaya, seperti perbedaan pola serta intensitas pemupukan antar lahan. Analisis terhadap selisih elevasi juga menunjukkan bahwa perbedaan ketinggian tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan galat prediksi, sehingga faktor topografi bukan satu-satunya penyebab variasi kandungan hara tanah.

Integrasi hasil interpolasi Ordinary Kriging dengan sistem inferensi berbasis Decision Tree mampu mendukung klasifikasi kesesuaian lahan secara lebih adaptif dengan mempertimbangkan hubungan spasial antar titik pengamatan dan parameter agronomis. Seluruh hasil analisis berhasil disajikan dalam dashboard Web-Based Geographic Information System (Web GIS) interaktif yang menampilkan distribusi hara, estimasi geostatistik, evaluasi galat, dan zonasi kesesuaian lahan. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat menjadi alat bantu analisis spasial untuk mendukung penerapan pertanian presisi pada budidaya kentang, dengan catatan bahwa informasi yang ditampilkan merepresentasikan kondisi lahan pada periode pengambilan data dan bukan data pemantauan secara real-time.

REFERENSI :

[1] A. Singh, S. N. Prasad, and P. K. Sharma, “Soil nutrient mapping using GIS and geostatistics,” Journal of the Indian Society of Soil Science, vol. 63, no. 1, pp. 13–20, 2015.

[2] FAO, “Remote sensing and GIS for sustainable agriculture and food security,” FAO Knowledge Repository, 2025. [Online]. Available: https://openknowledge.fao.org/. [Accessed: Jul. 20, 2026].

[3] Z. Khan, M. Zaman, M. Rahman, and S. Ahmed, “Spatial variability of soil nutrients in potato growing areas,” Pakistan Journal of Agricultural Sciences, vol. 53, no. 2, pp. 311–318, 2016.

[4] M. A. Oliver and R. Webster, “A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging,” Catena, vol. 113, pp. 56–69, 2014.

[5] T. Hengl, A Practical Guide to Geostatistical Mapping. Amsterdam, Netherlands: University of Amsterdam, 2009. [Online]. Available: https://spatial-analyst.net/book/. [Accessed: Jul. 20, 2026].

[6] P. Goovaerts, Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1997.

[7] K. Johnston, J. M. Ver Hoef, K. Krivoruchko, and N. Lucas, Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Redlands, CA, USA: ESRI Press, 2001.

[8] P. A. Burrough and R. A. McDonnell, Principles of Geographical Information Systems, 2nd ed. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 2004.

[9] P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, and D. W. Rhind, Geographic Information Systems and Science, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.

[10] R. Gebbers and V. I. Adamchuk, “Precision agriculture and food security,” Science, vol. 327, no. 5967, pp. 828–831, 2010.

[11] D. J. Mulla, “Twenty five years of precision agriculture research,” Biosystems Engineering, vol. 114, no. 4, pp. 358–371, 2013.

[12] D. L. Corwin and S. M. Lesch, “Application of soil electrical conductivity to precision agriculture,” Agronomy Journal, vol. 97, no. 1, pp. 35–43, 2005.

[13] J. W. Hummel, K. A. Sudduth, and S. J. Birrell, “Soil property mapping using on-the-go sensor data,” Computers and Electronics in Agriculture, vol. 32, pp. 149–168, 2001.

[14] V. I. Adamchuk, J. W. Hummel, M. T. Morgan, and S. K. Upadhyaya, “On-the-go soil sensors for precision agriculture,” Transactions of the ASABE, vol. 47, no. 5, pp. 1231–1244, 2004.

[15] BBSDLP, Petunjuk Teknis Evaluasi Lahan untuk Komoditas Pertanian. Bogor, Indonesia: Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, 2011.

[16] FAO, Guidelines for Soil Description, 4th ed. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

[17] W. R. Tobler, “A computer movie simulating urban growth in the Detroit region,” Economic Geography, vol. 46, no. sup1, pp. 234–240, 1970.