

Perancangan dan Implementasi Sistem Estimasi Sebaran NPK Tanah Menggunakan Metode *Inverse Distance Weighting* (IDW)

Febrian Josua Kontu
Telkom University Bandung
Fakultas Teknik Elektro
Bandung, Indonesia

febriankontu@student.telkomuniversity.ac.id

Angga Rusdinar
Telkom University Bandung
Fakultas Teknik Elektro
Bandung, Indonesia

anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id

Willy Anugrah Cahyadi
Telkom University Bandung
Fakultas Teknik Elektro
Bandung, Indonesia

waczze@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Kesuburan tanah merupakan faktor penting dalam menentukan produktivitas pertanian yang sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara makro Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K). Namun, kandungan NPK tanah bersifat tidak homogen secara spasial sehingga pengukuran satu titik tidak cukup untuk merepresentasikan kondisi lahan secara menyeluruh. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem estimasi sebaran NPK tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan pendekatan pengukuran multi-titik dan metode *interpolasi Inverse Distance Weighting* (IDW). Sistem dikembangkan menggunakan sensor NPK digital, mikrokontroler ESP32, dan modul GPS untuk mengakuisisi data unsur hara tanah serta koordinat lokasi pengukuran secara *real time*, kemudian data dikirimkan ke server berbasis *cloud* dan divisualisasikan melalui aplikasi mobile. Pengujian sistem dilakukan pada lima lahan dengan karakteristik lingkungan yang berbeda di Bandung Techno Park dengan jarak antar titik pengukuran tetap sebesar 2 meter. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi secara stabil dan menghasilkan data NPK multi-titik yang merepresentasikan variasi spasial unsur hara tanah. Estimasi sebaran NPK menggunakan metode IDW mampu membentuk peta distribusi unsur hara yang halus dan informatif, serta menunjukkan bahwa kepadatan titik pengukuran berpengaruh terhadap tingkat detail peta sebaran. Sistem yang dikembangkan berpotensi mendukung pemantauan kesuburan tanah dan pengambilan keputusan pemupukan secara lebih presisi.

Kata kunci— NPK, IDW, pengukuran multi titik, kesuburan tanah

berupa analisis laboratorium memang memiliki akurasi tinggi, tetapi memerlukan waktu dan biaya yang besar serta hanya merepresentasikan kondisi tanah pada titik tertentu, sehingga kurang efektif untuk menggambarkan kondisi lahan secara keseluruhan [4].

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan unsur hara tanah secara *real time* dengan efisiensi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Meskipun demikian, sebagian besar sistem IoT yang telah dikembangkan masih berfokus pada pengukuran satu titik dan belum memperhatikan aspek spasial sebaran NPK tanah [5]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengukuran multi-titik yang terintegrasi dengan informasi lokasi untuk memperoleh gambaran kesuburan tanah yang lebih representatif. Metode interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) dipilih karena mampu mengestimasi nilai unsur hara pada lokasi yang tidak diukur secara langsung dengan memberikan bobot lebih besar pada titik terdekat, serta memiliki kompleksitas komputasi yang rendah [6]. Penelitian ini mengusulkan sistem estimasi sebaran NPK tanah berbasis IoT dengan memanfaatkan sensor NPK digital, mikrokontroler ESP32, modul GPS, dan metode IDW untuk menghasilkan peta sebaran NPK tanah yang dapat mendukung pemantauan kesuburan lahan dan pengambilan keputusan pemupukan secara lebih presisi [7].

I. PENDAHULUAN

Kesuburan tanah merupakan faktor penting dalam menentukan produktivitas pertanian, terutama yang berkaitan dengan ketersediaan unsur hara makro Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K). Unsur-unsur tersebut berperan dalam proses fisiologis tanaman seperti pembentukan klorofil, pertumbuhan akar, serta pengaturan keseimbangan air dan ketahanan tanaman [1]. Namun, kandungan NPK dalam suatu lahan bersifat tidak homogen dan dapat bervariasi secara signifikan antar titik pengukuran akibat perbedaan tekstur tanah, drainase, topografi, aktivitas biologis, serta pola pemupukan sebelumnya [2], [3]. Metode konvensional

II. KAJIAN TEORI

A. Unsur Hara Makro (NPK)

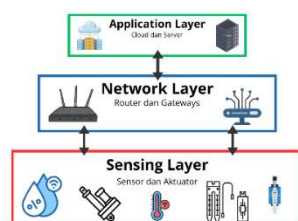
Unsur hara makro utama yang berperan penting dalam pertumbuhan tanaman adalah Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K). Nitrogen berfungsi sebagai komponen utama klorofil dan asam amino, sehingga berperan langsung dalam proses fotosintesis dan pembentukan jaringan vegetatif tanaman seperti daun dan batang. Kekurangan nitrogen umumnya ditandai dengan pertumbuhan tanaman yang kerdil dan perubahan warna daun menjadi kekuningan, sedangkan kelebihan nitrogen dapat menyebabkan pertumbuhan vegetatif berlebihan yang justru menurunkan kualitas hasil

panen. Fosfor memiliki peran penting dalam pembentukan sistem perakaran, pembelahan sel, serta proses transfer dan penyimpanan energi melalui senyawa adenosin trifosfat (ATP). Unsur ini juga berperan dalam proses pembungaan dan pembentukan buah, sehingga kekurangan fosfor dapat menghambat perkembangan tanaman secara keseluruhan. Sementara itu, kalium berfungsi dalam pengaturan keseimbangan air dan tekanan osmotik sel, penguatan jaringan tanaman, serta peningkatan ketahanan tanaman terhadap stres biotik dan abiotik seperti kekeringan dan serangan penyakit [1] [8].

Kandungan NPK dalam tanah tidak terdistribusi secara merata dan cenderung menunjukkan variasi spasial yang signifikan, bahkan dalam satu lahan dengan jarak antar titik pengukuran yang relatif dekat. Variabilitas ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain perbedaan tekstur dan struktur tanah, tingkat kelembapan, aktivitas mikroorganisme, topografi lahan, serta pola pengelolaan dan pemupukan sebelumnya [2] [9]. Selain itu, kandungan unsur hara tanah juga dapat berubah secara temporal akibat proses pencucian hara, penyerapan oleh tanaman, serta kondisi iklim. Kondisi tersebut menyebabkan pengukuran NPK pada satu titik saja tidak mampu merepresentasikan kondisi kesuburan tanah secara menyeluruh. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengukuran multi-titik untuk memperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai distribusi unsur hara makro pada suatu lahan sebagai dasar pengelolaan dan pemupukan yang lebih presisi.

B. Internet of Things (IoT) untuk Pertanian Presisi

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi yang memungkinkan berbagai perangkat fisik untuk terhubung ke internet dan saling bertukar data secara otomatis tanpa keterlibatan manusia secara langsung. Dalam konteks pertanian presisi, IoT dimanfaatkan untuk melakukan pemantauan parameter tanah, lingkungan, dan tanaman secara *real time* guna meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya seperti air dan pupuk [10]. Arsitektur IoT umumnya terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu sensing layer, network layer, dan application layer. Ketiga lapisan ini saling terintegrasi untuk membentuk sistem pemantauan yang utuh dan berkelanjutan. Konsep arsitektur berlapis tersebut memungkinkan data hasil pengukuran di lapangan dapat dikumpulkan, dikirimkan, dan diolah menjadi informasi yang berguna bagi pengguna dalam pengambilan keputusan [11].



GAMBAR 1
Arsitektur *Layer* IoT

Gambar 1 menunjukkan arsitektur layer IoT yang digunakan dalam sistem pertanian presisi. *Sensing layer* berfungsi sebagai lapisan akuisisi data yang terdiri dari sensor-sensor untuk mengukur parameter lingkungan, seperti suhu, kelembapan, pH tanah, serta kandungan unsur hara tanah meliputi Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K). Data hasil pengukuran pada *sensing layer* selanjutnya dikirimkan ke *network layer*, yang berperan sebagai lapisan komunikasi data melalui berbagai protokol dan media jaringan, seperti Wi-Fi, GSM, LoRa, maupun protokol komunikasi ringan seperti MQTT. Lapisan terakhir, yaitu *application layer*, berfungsi untuk mengolah, menyimpan, dan menyajikan data yang telah diterima dari *network layer* dalam bentuk informasi yang mudah dipahami, seperti grafik, tabel, dan peta digital pada aplikasi berbasis web atau perangkat bergerak. Integrasi ketiga lapisan pada arsitektur IoT ini memungkinkan sistem pertanian presisi bekerja secara efektif, adaptif terhadap kondisi lingkungan, serta mendukung efisiensi pemupukan dan pengelolaan lahan secara berkelanjutan [10] [11].

C. Estimasi Sebaran dan Pemetaan Metode IDW

Interpolasi spasial merupakan teknik yang digunakan untuk memperkirakan nilai suatu parameter pada lokasi yang tidak memiliki pengukuran langsung berdasarkan nilai dari titik-titik sampel di sekitarnya. Teknik ini banyak diterapkan dalam pemetaan sifat tanah dan lingkungan, terutama ketika jumlah data lapangan terbatas namun diperlukan gambaran distribusi nilai pada seluruh area pengamatan [12]. Pada konteks kesuburan tanah, interpolasi spasial berperan penting dalam memodelkan variasi kandungan unsur hara yang bersifat lokal dan tidak homogen, sehingga informasi yang dihasilkan lebih representatif dibandingkan pengukuran satu titik.

Salah satu metode interpolasi spasial yang umum digunakan adalah Inverse Distance Weighting (IDW). Metode IDW merupakan metode interpolasi deterministik yang didasarkan pada asumsi bahwa titik pengukuran yang lebih dekat memiliki pengaruh lebih besar terhadap nilai estimasi dibandingkan titik yang lebih jauh [6]. Kontribusi setiap titik sampel terhadap nilai estimasi berkurang seiring bertambahnya jarak, sehingga metode ini sesuai digunakan untuk pemetaan parameter lingkungan dengan korelasi spasial kuat. Selain itu, IDW bersifat sederhana, stabil, dan tidak memerlukan pemodelan statistik kompleks seperti variogram, sehingga mudah diimplementasikan pada sistem dengan keterbatasan komputasi [13] [14]. Secara matematis, nilai estimasi pada suatu lokasi dihitung sebagai rata-rata tertimbang dari nilai titik-titik sampel di sekitarnya dengan bobot yang berbanding terbalik terhadap jarak, yang dinyatakan pada Persamaan (1)

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i)}{d(x_0, x_i)^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}} \quad (1)$$

Akurasi hasil interpolasi IDW dipengaruhi oleh nilai parameter pangkat p , jumlah titik tetangga yang digunakan, serta distribusi spasial titik sampel. Nilai p yang kecil cenderung menghasilkan permukaan interpolasi yang lebih halus, sedangkan nilai p yang besar menyebabkan dominasi titik terdekat menjadi lebih kuat sehingga variasi lokal lebih menonjol [13]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode IDW mampu merepresentasikan variasi spasial sifat tanah secara efektif pada skala lahan kecil hingga menengah, khususnya ketika jumlah titik pengukuran terbatas namun tersebar secara merata [15] [16]. Oleh karena itu, metode IDW dinilai sesuai digunakan untuk estimasi sebaran NPK tanah berbasis data pengukuran multi-titik dalam sistem pertanian presisi.

D. Sensor NPK

Sensor NPK digital bekerja dengan mengestimasi kandungan unsur hara tanah berdasarkan respons listrik media tanah yang berkaitan dengan konduktivitas ion Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K). Prinsip pengukuran ini memanfaatkan karakteristik listrik tanah yang berubah seiring dengan konsentrasi ion terlarut, sehingga sensor dapat memberikan estimasi kadar NPK secara langsung di lapangan tanpa melalui proses analisis kimia seperti pada metode laboratorium konvensional [7] [17]. Pendekatan pengukuran *in situ* ini memungkinkan proses akuisisi data dilakukan dengan lebih cepat, praktis, dan efisien, terutama untuk aplikasi pemantauan kesuburan tanah secara real time. Data mentah hasil pembacaan sensor selanjutnya dikonversi menjadi nilai konsentrasi NPK melalui proses kalibrasi tertentu yang disesuaikan dengan karakteristik sensor dan kondisi tanah. Penggunaan antarmuka komunikasi RS485 dengan protokol Modbus RTU memungkinkan transmisi data yang lebih andal, stabil, dan tahan terhadap gangguan *noise*, khususnya pada lingkungan pertanian yang memiliki jarak kabel relatif panjang dan kondisi elektromagnetik yang tidak ideal, sehingga sensor NPK digital sesuai digunakan sebagai bagian dari sistem monitoring kesuburan tanah berbasis *Internet of Things*.

E. Modul GPS

Global Positioning System (GPS) merupakan sistem navigasi berbasis satelit yang digunakan untuk menentukan posisi geografis suatu objek di permukaan bumi berdasarkan perhitungan jarak terhadap beberapa satelit secara simultan. Modul GPS bekerja dengan menerima sinyal dari minimal empat satelit untuk menghitung posisi dua dimensi atau tiga dimensi melalui metode trilaterasi, sehingga diperoleh informasi koordinat geografis berupa latitude dan longitude [18]. Data posisi yang dihasilkan modul GPS umumnya

dikirimkan dalam format standar National Marine Electronics Association (NMEA), yang kemudian diproses oleh sistem untuk mengekstraksi informasi koordinat, kecepatan, jumlah satelit, serta parameter kualitas sinyal seperti HDOP [19]. Integrasi modul GPS dalam sistem monitoring NPK memungkinkan setiap data hasil pengukuran unsur hara tanah dikaitkan secara langsung dengan lokasi geografis titik pengukuran. Hal ini sangat penting dalam pengukuran multi-titik, karena informasi lokasi menjadi dasar dalam proses interpolasi spasial dan pemetaan sebaran unsur hara tanah. Dengan adanya data koordinat yang akurat, sistem mampu menghasilkan peta sebaran NPK yang lebih representatif terhadap kondisi lahan aktual, sehingga mendukung analisis spasial dan pengambilan keputusan pemupukan yang lebih presisi.

F. Modul GPS

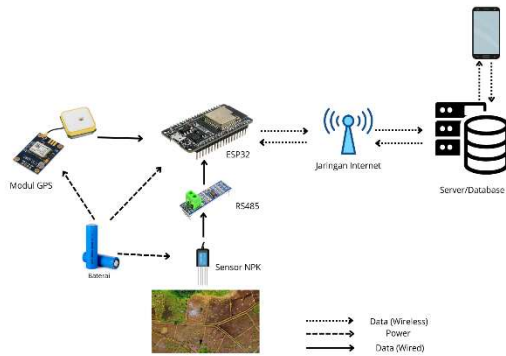
Firebase Firestore merupakan basis data NoSQL berbasis *cloud* yang dirancang untuk mendukung aplikasi *real time* dan sistem terdistribusi dengan kebutuhan sinkronisasi data yang tinggi. Firestore menggunakan model penyimpanan berbasis koleksi dan dokumen yang bersifat fleksibel, sehingga mampu menyimpan data sensor dalam berbagai struktur tanpa skema tetap (*schema-less*) [20]. Karakteristik ini menjadikan Firestore sesuai untuk aplikasi Internet of Things (IoT), khususnya pada sistem monitoring lingkungan yang menghasilkan data secara kontinu dan dinamis. Firestore juga mendukung mekanisme *real-time listener* yang memungkinkan perubahan data pada server langsung tersinkronisasi ke aplikasi klien tanpa perlu melakukan permintaan ulang secara manual. Dalam sistem monitoring NPK tanah berbasis IoT, Firestore berperan sebagai pusat penyimpanan data hasil pengukuran unsur hara tanah serta koordinat lokasi dari modul GPS. Data yang tersimpan selanjutnya dimanfaatkan oleh aplikasi mobile untuk proses visualisasi, analisis sebaran unsur hara, dan pemantauan kondisi lahan secara langsung. Dengan dukungan skalabilitas, keandalan, dan integrasi yang baik dengan aplikasi berbasis Android maupun *web*, penggunaan Firebase Firestore memungkinkan sistem monitoring NPK beroperasi secara efisien, responsif, dan mudah dikembangkan untuk kebutuhan pemantauan lahan pertanian berskala lebih luas.

III. METODE

Metode penelitian diawali dengan perancangan sistem monitoring dan estimasi sebaran NPK tanah berbasis *Internet of Things* (IoT). Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi sistem, pengambilan data lapangan, pengolahan dan penyimpanan data, serta analisis hasil menggunakan metode interpolasi spasial Inverse Distance Weighting (IDW). Alur penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan setiap tahap saling terintegrasi

dan mendukung tujuan penelitian, yaitu menghasilkan peta sebaran NPK tanah yang representatif.

A. Desain Sistem



GAMBAR 2 Desain Sistem

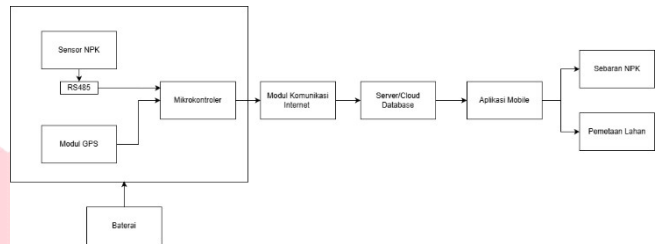
Desain sistem ini dirancang untuk mengukur, mengirim, dan menampilkan data kadar unsur hara tanah secara *real time*, dengan arsitektur dan alur kerja sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem terdiri atas beberapa komponen utama yang saling terhubung dan bekerja secara terintegrasi, dengan sumber daya berasal dari baterai Li-ion sebagai catu daya utama. Energi listrik dari baterai digunakan untuk menyalakan mikrokontroler ESP32 yang berperan sebagai pusat kendali sistem. ESP32 menerima data dari sensor NPK tanah melalui konverter RS485 yang berfungsi sebagai antarmuka komunikasi agar transmisi data tetap stabil, serta dari modul GPS yang digunakan untuk memperoleh informasi koordinat lokasi pengambilan data.

Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2, sensor NPK bertugas mengukur kadar Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) pada tanah, sedangkan modul GPS merekam posisi geografis berupa latitude dan longitude pada setiap titik pengukuran. Data hasil pembacaan sensor dan koordinat lokasi selanjutnya diproses dan diformat oleh ESP32 sebelum dikirimkan melalui jaringan internet menggunakan koneksi Wi-Fi menuju server atau database berbasis *cloud*. Data yang tersimpan dapat diakses secara daring melalui aplikasi pada *smartphone* atau *dashboard* berbasis web untuk menampilkan nilai NPK, lokasi titik pengukuran, serta peta sebaran unsur hara tanah. Dengan arsitektur sistem yang ditunjukkan pada Gambar 2, proses pemantauan kesuburan tanah dapat dilakukan secara cepat, efisien, dan *real time* tanpa memerlukan analisis laboratorium secara manual.

B. Diagram Blok

Berdasarkan Gambar 3, sistem dirancang menggunakan arsitektur terintegrasi yang terdiri atas blok sensor, pengendali, komunikasi, server, dan aplikasi pengguna. Sensor NPK berfungsi mengukur kandungan Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) tanah, sedangkan modul GPS

merekam koordinat lokasi pengukuran; seluruh data tersebut dikirimkan ke mikrokontroler melalui komunikasi RS485 untuk diproses sebagai pusat kendali sistem. Selanjutnya, data hasil pengolahan dikirimkan ke server atau *cloud database* melalui modul komunikasi internet dan diakses oleh aplikasi mobile untuk ditampilkan dalam bentuk pemetaan lahan serta sebaran nilai NPK. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, penggunaan baterai sebagai sumber daya memungkinkan sistem beroperasi secara mandiri di lapangan, sehingga proses akuisisi data, pengiriman, dan visualisasi



GAMBAR 3 Diagram Blok Sistem

informasi kesuburan tanah dapat dilakukan secara *real time*.

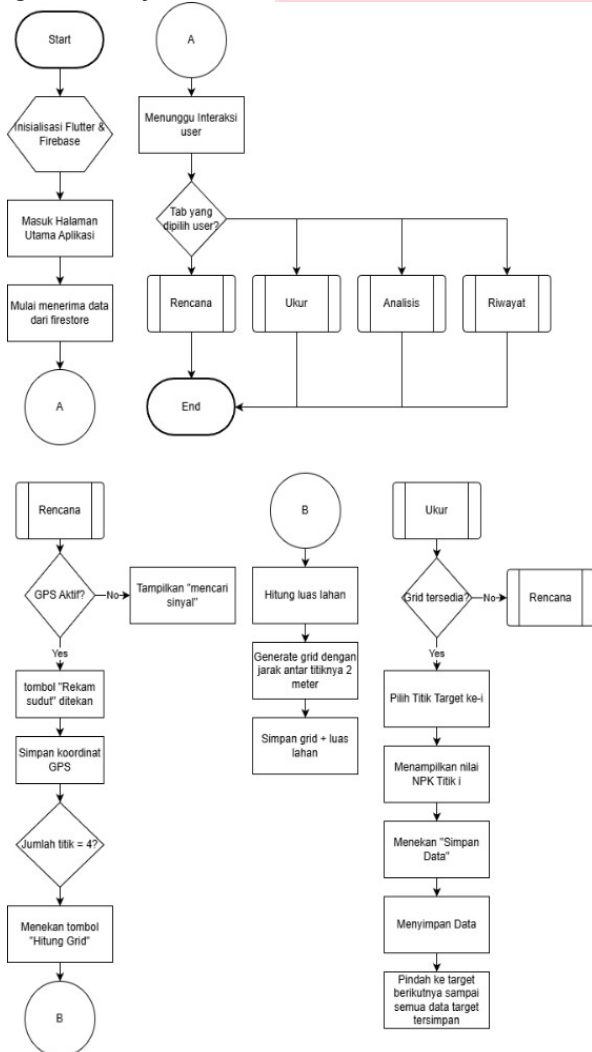
C. Komponen Utama Sistem

TABEL 1 Spesifikasi Komponen

No	Komponen	Spesifikasi Utama
1	ESP32	Mikrokontroler 32-bit, Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, tegangan kerja 3,3 V, mendukung komunikasi UART, SPI, dan I2C.
2	Sensor NPK DFRobot	Sensor unsur hara tanah digital berbasis RS485 (Modbus RTU), parameter pengukuran Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K), rentang pengukuran 0–2999 mg/kg, akurasi ±5% FS, tegangan kerja 5–30 V DC, digunakan untuk pengukuran in situ unsur hara tanah.
3	Modul GPS Neo-6M	Modul Global Positioning System (GPS) berbasis u-blox NEO-6M, akurasi posisi ±2,5 m CEP, antarmuka UART, tegangan kerja 3,3–5 V, menghasilkan data koordinat latitude dan longitude dalam format NMEA.

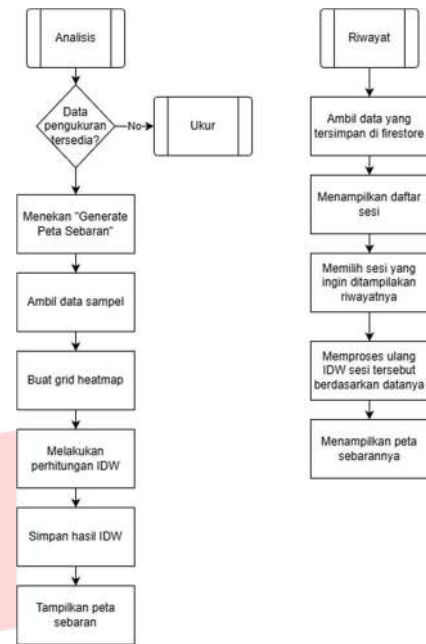
Tabel 1 menyajikan komponen utama yang digunakan dalam perancangan sistem monitoring dan estimasi sebaran NPK tanah beserta spesifikasi utamanya. ESP32 digunakan sebagai pusat kendali sistem karena telah dilengkapi dengan kemampuan komunikasi nirkabel dan antarmuka yang mendukung integrasi berbagai modul. Sensor NPK DFRobot berfungsi untuk mengukur kandungan unsur hara Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) secara in situ melalui komunikasi RS485, sementara modul GPS Neo-6M digunakan untuk memperoleh koordinat geografis setiap titik pengukuran. Kombinasi ketiga komponen utama yang dirangkum pada Tabel 1 memungkinkan sistem melakukan akuisisi data unsur hara tanah, penentuan lokasi pengukuran, serta pengiriman data secara real time secara terintegrasi.

D. Algoritma Kerja Sistem



GAMBAR 4

Flowchart Mobile App (Halaman Utama, Tab Rencana, dan Tab Ukur)

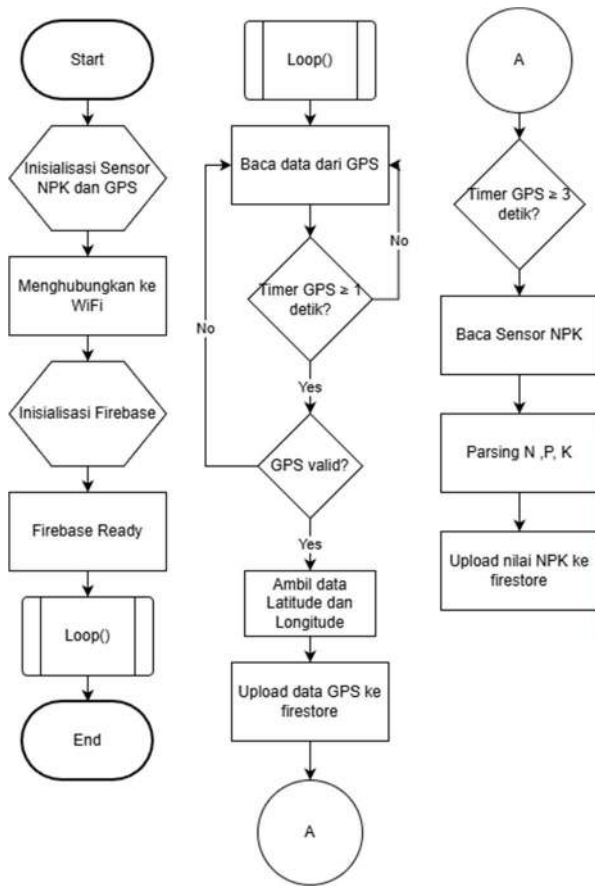


GAMBAR 5

Flowchart Mobile App (Tab Analisis, dan Tab Riwayat)

Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5, alur kerja aplikasi mobile diawali dengan inisialisasi Firebase, kemudian aplikasi menampilkan halaman utama dan menerima data dari server. Pada tab Rencana, aplikasi merekam koordinat lahan menggunakan GPS untuk menghitung luas dan membentuk grid pengukuran, yang selanjutnya digunakan pada tab Ukur untuk melakukan pengukuran NPK pada setiap titik grid dan menyimpan data ke database. Tab Analisis memproses data pengukuran untuk membentuk *heatmap* dan menghitung estimasi sebaran NPK menggunakan metode IDW, sedangkan tab Riwayat digunakan untuk menampilkan kembali dan memproses ulang data pengukuran sebelumnya. Dengan alur ini, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, seluruh proses perencanaan, pengukuran, analisis, dan visualisasi sebaran NPK terintegrasi dalam satu aplikasi.

E. Skenario dan Lingkungan Pengujian Sistem



GAMBAR 7

Flowchart Mikrokontroler ESP32

Berdasarkan Gambar 6, alur kerja mikrokontroler ESP32 diawali dengan inisialisasi sensor NPK dan modul GPS, dilanjutkan dengan koneksi ke jaringan Wi-Fi serta inisialisasi Firebase hingga sistem siap digunakan. Selanjutnya, ESP32 menjalankan *loop* utama yang secara periodik membaca data GPS dan sensor NPK menggunakan mekanisme *timer*. Data GPS hanya diproses dan dikirim ke Firestore ketika interval pembacaan terpenuhi dan data dinyatakan valid, sementara pembacaan sensor NPK menghasilkan nilai Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) yang diparsing sebelum diunggah ke *cloud*. Alur ini, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6, memastikan data lokasi dan unsur hara tanah diperoleh secara terintegrasi dan tersimpan secara *real time* untuk mendukung pemetaan sebaran NPK yang akurat.



GAMBAR 6
Lima Lahan Pengujian

Pengujian sistem dilakukan pada lima lahan berbeda yang berlokasi di Bandung Techno Park (BTP), Telkom University, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7, dengan tujuan mengevaluasi kinerja sistem estimasi sebaran NPK tanah pada kondisi lapangan yang bervariasi. Seluruh pengujian dilakukan pada rentang suhu lingkungan 30–32 °C sehingga kondisi termal relatif seragam. Pada setiap lahan, proses pengujian diawali dengan perekaman koordinat titik sudut menggunakan modul GPS untuk membentuk batas area pengujian dalam peta digital, yang selanjutnya digunakan sebagai acuan penentuan titik-titik pengukuran unsur hara tanah.

Setelah area lahan terbentuk, pengukuran Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) dilakukan secara multi-titik dengan jarak antar titik pengukuran tetap sebesar 2 meter guna menjaga konsistensi kepadatan data. Jumlah titik pengukuran disesuaikan dengan luas masing-masing lahan, sementara konfigurasi perangkat keras, perangkat lunak, dan koneksi internet dibuat identik pada seluruh pengujian untuk meminimalkan pengaruh variabel sistem. Gambar 7 memperlihatkan bahwa kelima lahan memiliki perbedaan karakteristik fisik dan lingkungan, seperti variasi tutupan vegetasi, tingkat kelembapan tanah, dan kerapatan tanaman, sehingga pengujian ini diharapkan mampu merepresentasikan kondisi lapangan yang beragam serta menguji kemampuan sistem dalam memetakan sebaran NPK tanah secara akurat.

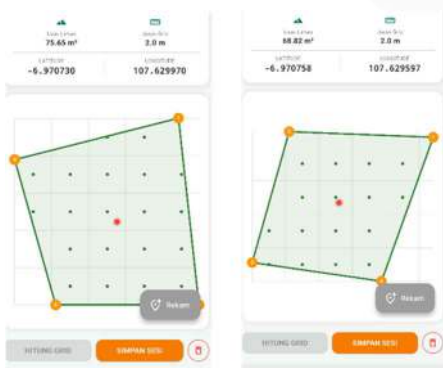
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pemetaan Lahan Menggunakan GPS

TABEL 2
Koordinat Titik Sudut Lahan Pengujian

Lahan 1	1	-6.970843	107.630409
	2	-6.970843	107.630480
	3	-6.970875	107.630496
	4	-6.970880	107.630427
Lahan 2	1	-6.970680	107.630000
	2	-6.970770	107.630020
	3	-6.970770	107.629940
	4	-6.970700	107.629920
Lahan 3	1	-6.970723	107.629648
	2	-6.970720	107.629570
	3	-6.970790	107.629550
	4	-6.970800	107.629620
Lahan 4	1	-6.970894	107.629515
	2	-6.970890	107.629477
	3	-6.970950	107.629452
	4	-6.970950	107.629495
Lahan 5	1	-6.970637	107.630170
	2	-6.970644	107.630149
	3	-6.970664	107.630144
	4	-6.970667	107.630167

Pengujian pemetaan lahan dilakukan untuk memastikan sistem mampu membentuk area lahan berdasarkan koordinat geografis yang direkam menggunakan modul GPS. Proses diawali dengan perekaman koordinat titik sudut lahan pada posisi diam untuk memperoleh data latitude dan longitude yang stabil, kemudian data tersebut dikirim dan disimpan pada server untuk membentuk batas area lahan dalam peta digital. Visualisasi batas lahan selanjutnya ditampilkan pada aplikasi mobile sebagai dasar penentuan titik-titik pengukuran unsur hara tanah di dalam area lahan. Tabel 2 menampilkan hasil perekaman koordinat titik sudut pada lima lahan pengujian, di mana setiap lahan direpresentasikan oleh empat titik sudut yang dicatat secara berurutan untuk membentuk area tertutup. Perbedaan nilai koordinat antar lahan menunjukkan variasi lokasi dan ukuran area pengujian, sehingga data pada Tabel 2 menjadi dasar penting dalam proses pemetaan lahan dan pengukuran NPK secara multi-titik.



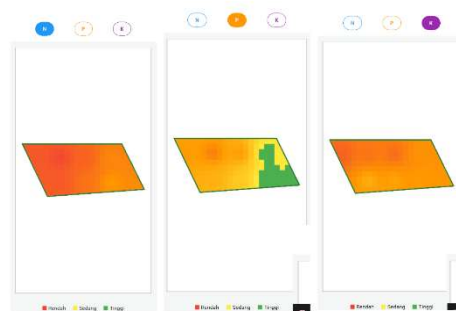
Gambar 8 memperlihatkan hasil pemetaan lahan yang ditampilkan pada aplikasi mobile setelah perekaman koordinat titik sudut lahan menggunakan modul GPS. Setiap

titik sudut ditandai dengan penanda berwarna oranye dan dihubungkan secara berurutan untuk membentuk area lahan tertutup yang merepresentasikan bentuk dan luas area pengukuran. Di dalam batas lahan tersebut, sistem secara otomatis membentuk grid pengukuran dengan jarak antar titik tetap sebesar 2 meter, sehingga titik-titik pengambilan data NPK tersebar secara merata. Grid ini menjadi acuan pengukuran NPK secara multi-titik, sementara informasi status GPS dan koordinat lokasi ditampilkan sebagai indikator keberhasilan akuisisi data posisi sebelum proses pengukuran dilakukan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8.

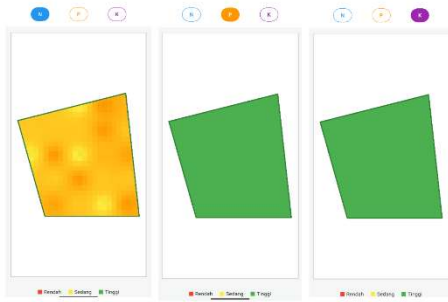
B. Hasil Pengukuran NPK Multi-Titik

Hasil pengukuran multi-titik pada lima lahan pengujian menunjukkan adanya variasi nilai NPK yang signifikan baik antar titik dalam satu lahan maupun antar lahan. Beberapa lahan menunjukkan nilai Nitrogen yang relatif rendah dengan fluktuasi tinggi, sementara lahan lainnya memiliki kandungan Fosfor dan Kalium yang lebih dominan atau relatif stabil. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa kandungan unsur hara tanah bersifat heterogen secara spasial dan dipengaruhi oleh kondisi lokal seperti tekstur tanah, kelembapan, tutupan vegetasi, serta pola pengelolaan lahan sebelumnya. Temuan ini menegaskan bahwa pengukuran satu titik tidak cukup untuk menggambarkan kondisi kesuburan tanah secara menyeluruh, sehingga pendekatan pengukuran multi-titik sangat penting sebagai dasar estimasi sebaran NPK dan pengambilan keputusan pengelolaan lahan yang lebih akurat.

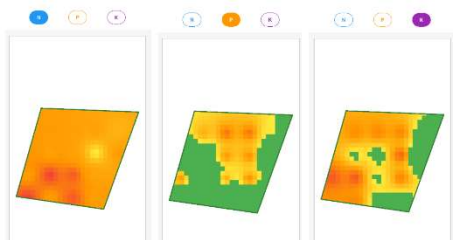
C. Hasil Estimasi Sebaran NPK Menggunakan IDW



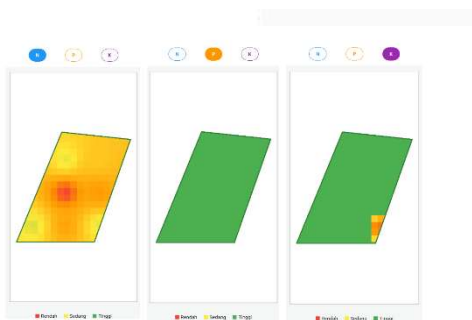
GAMBAR 9
Hasil Estimasi Sebaran NPK Dengan Metode IDW Pada



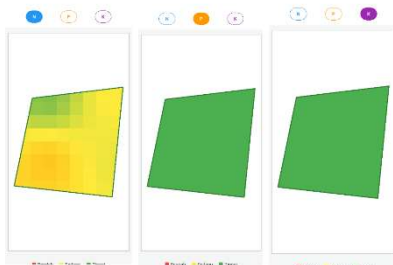
GAMBAR 10
Hasil Estimasi Sebaran NPK Dengan Metode IDW
Pada Lahan 2



GAMBAR 11
Hasil Estimasi Sebaran NPK Dengan Metode IDW
Pada Lahan 3



GAMBAR 12
Hasil Estimasi Sebaran NPK Dengan Metode
IDW Pada Lahan 4



GAMBAR 8 Hasil Estimasi Sebaran NPK
Dengan Metode IDW Pada Lahan 5

Berdasarkan Gambar 9 hingga Gambar 13, hasil estimasi sebaran NPK menggunakan metode Inverse Distance Weighting (IDW) menunjukkan bahwa setiap lahan memiliki karakteristik distribusi unsur hara yang berbeda. Pada Lahan 1 yang diuji menggunakan 8 titik pengukuran (Gambar 9), sebaran Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) menunjukkan variasi spasial yang cukup jelas, dengan N dan P cenderung tidak homogen, sementara K relatif lebih stabil. Lahan 2, yang memiliki jumlah titik pengukuran paling banyak yaitu 20 titik (Gambar 10), memperlihatkan sebaran P dan K yang relatif homogen dan didominasi kategori tinggi, sedangkan N masih menunjukkan variasi lokal. Kepadatan titik pengukuran yang lebih tinggi pada lahan ini menghasilkan peta sebaran yang lebih halus dan konsisten.

Pada Lahan 3 dengan 16 titik pengukuran (Gambar 11), hasil estimasi menunjukkan heterogenitas unsur hara yang cukup tinggi, terutama pada Nitrogen yang memiliki perbedaan zona rendah hingga sedang dalam satu area lahan. Pola ini menegaskan bahwa lahan tersebut memiliki variasi kondisi tanah yang signifikan secara lokal. Lahan 4, yang diuji menggunakan 7 titik pengukuran (Gambar 12), menunjukkan distribusi Fosfor dan Kalium yang relatif homogen dan berada pada kategori tinggi, meskipun Nitrogen masih menampilkan variasi lokal pada beberapa area. Sementara itu, Lahan 5 dengan 4 titik pengukuran (Gambar 13) memperlihatkan pola sebaran NPK yang paling homogen, khususnya untuk unsur P dan K, meskipun variasi kecil masih terlihat pada Nitrogen. Secara keseluruhan, hasil pada Gambar 9–13 menunjukkan bahwa metode IDW mampu merepresentasikan variasi spasial unsur hara tanah berdasarkan data pengukuran multi-titik, serta menegaskan bahwa peningkatan jumlah dan kepadatan titik pengukuran berpengaruh terhadap tingkat detail dan kehalusan peta sebaran NPK yang dihasilkan. Temuan ini memperkuat pentingnya pendekatan pengukuran multi-titik sebagai dasar pemetaan kesuburan tanah dan pengambilan keputusan pemupukan secara presisi.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring serta estimasi sebaran unsur hara Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) tanah berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan pengukuran multi-titik. Sistem mampu melakukan akuisisi data NPK secara *real time*, merekam koordinat lokasi menggunakan modul GPS, serta mengirimkan data ke server berbasis *cloud* untuk keperluan penyimpanan dan visualisasi melalui aplikasi mobile. Pengujian pada lima lahan dengan karakteristik lingkungan yang berbeda menunjukkan bahwa

sistem dapat beroperasi secara stabil dan terintegrasi dalam kondisi lapangan nyata.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kandungan NPK tanah bersifat heterogen secara spasial, sehingga pengukuran satu titik tidak cukup untuk merepresentasikan kondisi kesuburan lahan secara menyeluruh. Penerapan metode interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) mampu mengolah data pengukuran multi-titik menjadi peta sebaran NPK yang representatif, serta menunjukkan bahwa kepadatan titik pengukuran berpengaruh terhadap tingkat detail peta sebaran yang dihasilkan. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan berpotensi menjadi alat bantu yang efektif untuk pemantauan kesuburan tanah dan mendukung pengambilan keputusan pemupukan serta pengelolaan lahan secara lebih presisi.

REFERENSI

- [1] R. Madhumathi, T. Arumuganathan and R. Shruthi, "Soil Nutrient Detection and Recommendation Using IoT and Fuzzy Logic," *Tech Science Press*, vol. 43, no. 12, pp. 455-469, 2021.
- [2] S. K. Chandniha, H. Chouskey, S. Khunte, M. Sharma and Harithalekshmi, "Estimation of Soil Nitrogen, Phosphorous and Potassium Using IoT Based Sensor," *Journal of Experimental Agriculture International*, vol. 46, no. 8, p. 557–564, 2024.
- [3] R. Hartono, N. M. Yoeseff, F. A. Purnomo, M. A. Safi'ie and S. A. Bawono, "Portable internet of things-based soil nutrients monitoring for precision and efficient smart farming," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 5, p. 3326–3333, 2024.
- [4] N. R. Zani, A. H. Alasiry and A. Wijayanto, "Design and Development of Soil Nutrients Level Detection System," *The Indonesian Green Technology Journal*, vol. 46, no. 8, pp. 55-63, 2022.
- [5] A. Thoriq, L. H. Pratopo, R. M. Sampurno and S. H. Shafiyullah, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Tanah Berbasis Internet of Things," *Jurnal Keteknikan Pertanian*, vol. 10, no. 3, pp. 268-280, 2022.
- [6] M. Nikpey, M. Sedighkia and M. B. Nateghi, "Comparison of Spatial Interpolation Methods for Mapping the Qualitative Properties of Soil," *Advances in Agricultural Science*, vol. 5, no. 3, pp. 1-15, 2017.
- [7] S. Postolache, P. Sebastião, V. Vitor, O. Postolache and F. Cercas, "IoT-Based Systems for Soil Nutrients Assessment in Horticulture," *Sensors*, vol. 23, no. 1, 2022.
- [8] H. Lili, L. Yuanchang, M. Wu and M. Jinghui, "Spatial Patterns of Soil Organic Matter, Nitrogen, Phosphorus and Potassium," *Journal of Resources and Ecology*, vol. 13, no. 3, pp. 417-427, 2022.
- [9] C. Ji, H. Liu, Q. Lin and G. Feng, "Spatial-Temporal Variation of N, P, and K Stoichiometry," *Agriculture*, vol. 12, no. 1, 2021.
- [10] A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas and C. Kittas, "Internet of Things in agriculture," *Biosystems Engineering*, vol. 164, pp. 31-48, 2017.
- [11] F. A. Alaba, A. Jegede, U. Sani and E. G. Dada, "Artificial Intelligence of Things (AIoT) Solutions," *Artificial Intelligence of Things*, pp. 123-142, 2024.
- [12] G. A. Tiruneh, R. Tusiime and M. Tenywa, "Variability modeling and mapping of soil properties for improved management in Ethiopia," *Agrosystems, Geosciences, and Environment*, vol. 6, no. 1, 2023.
- [13] Z. Zhao, "A Novel Interpolation Method Combining RBF and IDW," *Agronomy*, vol. 14, no. 11, 2024.
- [14] E. L. Ramos and G. P. Dimuro, "A Novel Formulation for Inverse Distance Weighting," *ICCS*, pp. 576-589, 2020.
- [15] S. Roy and S. Akter, "Nutrient Potential Mapping of Soils," *Caraka Tani*, vol. 39, no. 2, pp. 396-410, 2024.
- [16] E. G. Matcham and S. K. Subburayalu, "Implications of choosing different interpolation methods," *Crop, Forage & Turfgrass Management*, vol. 7, no. 2, 2021.
- [17] S. Dattatreya, A. N. Khan, K. Jena and G. Chatterjee, "Conventional to Modern Methods of Soil NPK Sensing," *IEEE Sensors Journal*, 2023.
- [18] Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger and Wasle, GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More, Graz, SpringerWienNewYork, 2008.
- [19] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, Understanding GPS: Principles and Applications, Boston: Artech House, 2006.
- [20] "Cloud Firestore," Google Cloud, [Online]. Available: <https://firebase.google.com/docs/firestore>. [Accessed 11 Januari 2026].

