

Menggali Nilai Strategis dari Tanah

Panduan Filosofi dan Metodologi Riset Data Sains untuk INA-VERITY 2.0

Dipersiapkan oleh:

Elwin Ardirianto

Founder Agri Sentinel

Badan Swasta Nasional Pengelola Data dan Informasi Tanah Indonesia

Jakarta, 2026

DAFTAR ISI

PENDAHULUAN

Bab 1. METODE KONVENSIONAL STATISTIK

Bab 2. METODE ADVANCE STATISTIK

Bab 3. METODE MACHINE LEARNING

Bab 4. METODE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Bab 5. AGENDA RISET BERKELANJUTAN, 20 KONSEP USULAN

Bab 6. PANDUAN MENUMBUHKAN KEJELIAN RISET

Bab 7. PENUTUP: MENGUNDANG PARTISIPASI DALAM REVOLUSI DATA PERTANIAN

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang: Mengapa Dokumen Ini Diperlukan?

INA-VERITY 2.0 telah dirancang sebagai kerangka kerja pengumpulan data tanah, iklim, dan manajemen yang paling komprehensif yang pernah dimiliki Indonesia. Dalam beberapa tahun ke depan, sistem ini akan mengakumulasi jutaan titik sampel dengan puluhan parameter—sebuah aset nasional yang belum pernah ada sebelumnya. Data ini tidak hanya akan digunakan untuk penilaian lahan dan rekomendasi teknis, tetapi juga merupakan fondasi bagi lahirnya pengetahuan baru, inovasi kebijakan, dan terobosan ilmiah yang dapat mengubah wajah pertanian Indonesia.

Namun, data yang melimpah tanpa panduan riset yang terstruktur hanya akan menjadi “gudang angka” yang tidak berbicara. Dokumen ini hadir untuk menjawab pertanyaan: **bagaimana kita menggali nilai strategis dari data INA-VERITY?** Dengan menyediakan peta jalan metodologi—mulai dari statistika konvensional hingga kecerdasan artifisial—dokumen ini bertujuan mengubah data menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti, kebijakan berbasis bukti, dan inovasi yang disruptif.

1.2. Tujuan Dokumen

1. Menjadi **kompas** bagi peneliti, akademisi, analis kebijakan, dan praktisi data sains dalam mengeksplorasi data INA-VERITY.
2. Menyediakan **metodologi yang terbukti** untuk mengidentifikasi korelasi, tren, sensitivitas, serta membangun model prediktif dan preskriptif.
3. Mendorong lahirnya **riset-riset unggulan** yang berdampak pada ketahanan pangan, efisiensi subsidi, adaptasi perubahan iklim, dan keberlanjutan lingkungan.
4. Membangun **ekosistem kolaboratif** antara ilmuwan tanah, agronom, ekonom, data scientist, dan pengambil kebijakan.

1.3. Untuk Siapa Dokumen Ini Ditujukan?

- **Peneliti dan akademisi** (ilmu tanah, agronomi, ekonomi pertanian, ilmu lingkungan, data sains).
- **Analisis kebijakan** di kementerian (Kementan, KLHK, Bappenas, BPS) dan pemerintah daerah.

- **Data scientist** di sektor swasta (perkebunan, pupuk, asuransi, perbankan).
- **Mahasiswa pascasarjana** yang ingin mengambil topik riset berbasis data nasional.
- **Praktisi pembangunan** (LSM, lembaga donor) yang membutuhkan bukti untuk advokasi.

1.4. Cara Menggunakan Dokumen Ini

- **Buku panduan teknik** – setiap bab dapat dibaca terpisah sesuai kebutuhan riset.
- **Inspirasi agenda riset** – bab tentang agenda unggulan memberikan ide-ide konkret yang dapat diadaptasi.
- **Pemicu diskusi kolaboratif** – dokumen ini mengundang berbagai disiplin untuk bekerja sama.

1.5. Manfaat dan Dampak

Pemangku Kepentingan	Manfaat
Peneliti	Mempersingkat kurva belajar, menghasilkan publikasi berkualitas, membuka kolaborasi lintas disiplin.
Pembuat kebijakan	Bukti ilmiah untuk perencanaan presisi, alokasi anggaran tepat sasaran, evaluasi program objektif.
Sektor swasta	Peluang inovasi produk (pupuk spesifik lokasi, asuransi berbasis risiko), efisiensi operasional, kepatuhan standar keberlanjutan.
Bangsa	Pertanian berbasis data yang tangguh terhadap perubahan iklim, peningkatan produktivitas dengan input efisien, perlindungan sumber daya lahan untuk generasi mendatang.

BAB 1 – METODE KONVENSIONAL STATISTIK

1.1. Pendahuluan

Statistika konvensional adalah fondasi awal setiap riset. Metode ini digunakan untuk memahami karakteristik dasar data, menguji hipotesis, dan membangun hubungan awal antar variabel. Tahap ini krusial untuk memastikan data valid sebelum masuk ke analisis yang lebih kompleks.

1.2. Analisis Korelasi

Teknik:

- **Pearson:** korelasi linear antara dua variabel numerik.
- **Spearman:** korelasi monoton (tidak harus linear).
- **Kendall tau:** untuk data ordinal atau sampel kecil.

Tujuan: Mengidentifikasi kekuatan dan arah hubungan antar parameter tanah (misal pH vs Al-dd, C-org vs KTK).

Contoh Kasus:

Peneliti ingin mengetahui apakah ada hubungan antara pH tanah dan kandungan Aluminium dapat ditukar (Al-dd) di lahan masam Lampung. Dari 500 titik sampel, korelasi Pearson menunjukkan $r = -0,78$ ($p < 0,001$). Artinya semakin tinggi pH, semakin rendah Al-dd, dengan hubungan yang sangat kuat.

Dampak:

- Kuantitatif: koefisien korelasi dapat digunakan untuk memperkirakan penurunan Al-dd setiap kenaikan 0,5 pH.
- Kualitatif: dasar ilmiah rekomendasi pengapuran untuk menurunkan toksisitas Al.

Interpretasi Semantik dengan Generative AI:

LLM (Large Language Model) dapat menerjemahkan output korelasi menjadi narasi: *"Analisis menunjukkan korelasi negatif kuat ($r = -0,78$) antara pH dan Al-dd, yang berarti setiap kenaikan 0,5 pH menurunkan Al-dd sekitar 1,2 cmol/kg. Oleh karena itu, pengapuran sangat efektif untuk mengurangi toksisitas Al di lahan ini."*

1.3. Regresi Linear Sederhana dan Berganda

Teknik: Ordinary Least Squares (OLS), uji asumsi klasik (normalitas, heteroskedastisitas, multikolinearitas).

Tujuan: Memprediksi nilai satu variabel (misal produktivitas padi) berdasarkan satu atau lebih variabel bebas.

Contoh Kasus:

Menggunakan data 1.000 petak lahan sawah di Jawa Barat, peneliti membangun model regresi produktivitas = $a + b_1 \times \text{pH} + b_2 \times \text{C-org} + b_3 \times \text{P-tersedia} + b_4 \times \text{K-tersedia}$. Hasil menunjukkan bahwa pH ($\beta=0,32$) dan C-org ($\beta=0,28$) memiliki kontribusi terbesar terhadap produktivitas, dengan $R^2 = 0,67$.

Dampak:

- Identifikasi faktor dominan yang mempengaruhi hasil panen.
- Dasar untuk rekomendasi perbaikan (misal prioritas peningkatan C-org).

Interpretasi Semantik: LLM dapat menghasilkan ringkasan: *“Model regresi menunjukkan bahwa pH dan C-org adalah dua faktor paling menentukan produktivitas padi di Jawa Barat. Setiap kenaikan 0,5 pH meningkatkan produktivitas sekitar 0,8 ton/ha. Rekomendasi: tingkatkan pH melalui pengapuran dan C-org melalui pemberian pupuk organik.”**

1.4. Analisis Tren Temporal

Teknik: Uji Mann-Kendall, regresi time series, smoothing (moving average).

Tujuan: Mendeteksi perubahan kesuburan tanah dalam kurun waktu 5–10 tahun.

Contoh Kasus:

Data C-Organik dari 200 titik pemantauan tetap di lahan sawah intensif selama 10 tahun menunjukkan tren penurunan signifikan dengan slope $-0,15\%$ per tahun ($p < 0,01$). Analisis ini dilakukan dengan uji Mann-Kendall.

Dampak:

- Peringatan dini degradasi lahan.
- Evaluasi efektivitas program konservasi.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menyusun laporan: *“Dalam dekade terakhir, kandungan C-organik lahan sawah di lokasi X menurun rata-rata 0,15% per tahun. Jika tidak ada intervensi, dalam 10 tahun ke depan C-organik akan turun hingga 1,5%, mengakibatkan penurunan produktivitas sekitar 20%. Program pengembalian jerami dan pupuk organik harus segera digencarkan.”**

1.5. Uji Beda dan Analisis Varians (ANOVA)

Teknik: t-test, ANOVA satu arah, uji non-parametrik (Mann-Whitney, Kruskal-Wallis).

Tujuan: Membandingkan kondisi tanah antar wilayah, sistem pengelolaan, atau periode waktu.

Contoh Kasus:

Peneliti membandingkan IKT lahan sawah di tiga kabupaten: Indramayu, Subang, dan Karawang. ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan ($F = 12,3$, $p < 0,001$). Post-hoc test mengungkap bahwa IKT Indramayu lebih rendah secara signifikan dibanding dua kabupaten lain.

Dampak:

- Dasar advokasi praktik pertanian berkelanjutan.
- Identifikasi daerah prioritas intervensi.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menghasilkan: *“Indramayu memiliki skor kesehatan tanah yang lebih rendah dibanding Subang dan Karawang. Hal ini diduga karena intensitas penggunaan pupuk kimia yang lebih tinggi dan rendahnya penggunaan bahan organik. Rekomendasi: alokasikan program bantuan pupuk organik untuk Indramayu.”*

1.6. Interpretasi Semantik dengan Generative AI – Pendekatan Umum

Dalam semua metode di atas, LLM (seperti Llama, Mistral, atau GPT) dapat digunakan untuk:

- **Menyusun laporan otomatis** berdasarkan output statistik.
- **Menjelaskan hasil** dalam bahasa yang mudah dipahami oleh petani dan pembuat kebijakan.

- **Membangun grounding** dengan menyertakan referensi dokumen teknis (panduan BSIP, jurnal) sehingga rekomendasi berbasis bukti.

Teknik implementasi: Retrieval-Augmented Generation (RAG) dengan basis pengetahuan dokumen pertanian dan data INA-VERITY.

BAB 2 – METODE ADVANCE STATISTIK

2.1. Analisis Komponen Utama (PCA)

Teknik: Reduksi dimensi dengan mengubah sekumpulan variabel berkorelasi menjadi komponen utama yang tidak berkorelasi.

Tujuan: Menyederhanakan puluhan parameter menjadi beberapa faktor laten yang mewakili sebagian besar variasi data.

Contoh Kasus:

Dari 25 parameter tanah di 3.000 titik, PCA menghasilkan 5 komponen dengan eigenvalue >1 yang menjelaskan 78% total varians. Komponen 1 didominasi oleh C-org, KTK, P, K (interpretasi: "kesuburan umum"). Komponen 2 didominasi oleh Cd, Pb, As (interpretasi: "risiko kontaminasi"). Komponen 3 oleh Al-dd dan pH (interpretasi: "keasaman").

Dampak:

- Visualisasi pola melalui biplot.
- Input untuk pembobotan indeks kesuburan.
- Identifikasi parameter kunci yang perlu diukur secara rutin.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menulis: *"Analisis PCA menunjukkan bahwa variasi data tanah di Indonesia terutama dipengaruhi oleh tiga faktor: kesuburan umum (C-org, KTK, P, K), kontaminasi logam berat, dan keasaman. Untuk monitoring nasional, cukup fokus pada parameter-parameter ini."*

2.2. Analisis Faktor dan Structural Equation Modeling (SEM)

Teknik: Confirmatory Factor Analysis (CFA) untuk menguji apakah konstruk laten (misal "kesehatan tanah") dapat dijelaskan oleh parameter terukur; SEM untuk menguji hubungan kausal antar konstruk.

Tujuan: Memvalidasi kerangka konseptual INA-VERITY dan menguji jalur pengaruh antar pilar.

Contoh Kasus:

Peneliti menguji model di mana Pilar Fisika mempengaruhi Pilar Biologi, yang kemudian mempengaruhi produktivitas. SEM menunjukkan jalur signifikan dengan

RMSEA < 0,05, mengonfirmasi bahwa perbaikan fisika tanah (misal mengurangi bulk density) meningkatkan aktivitas mikroba, yang pada akhirnya meningkatkan produktivitas.

Dampak:

- Bukti ilmiah untuk kerangka INA-VERITY.
- Dasar rekomendasi intervensi berantai.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menjelaskan: *"Model menunjukkan bahwa perbaikan fisik tanah, seperti pengurangan kepadatan, akan meningkatkan aktivitas mikroba yang kemudian meningkatkan ketersediaan hara dan hasil panen. Oleh karena itu, program konservasi tanah harus dimulai dari perbaikan struktur tanah."*

2.3. Analisis Cluster (Hierarki, K-Means, GMM)

Teknik: Pengelompokan objek (titik sampel) berdasarkan kemiripan karakteristik.

Tujuan: Membuat tipologi lahan, zonasi agro-ekologi, atau tipe kesuburan.

Contoh Kasus:

Dengan data 10.000 titik sampel dari berbagai provinsi, clustering K-Means (dengan optimalisasi silhouette score) menghasilkan 6 cluster. Cluster 1: lahan subur vulkanik (C-org tinggi, pH netral). Cluster 2: lahan masam miskin hara (pH rendah, Al tinggi, P rendah). Cluster 3: lahan tercemar (Cd, Pb tinggi). Cluster 4: lahan gambut. dll.

Dampak:

- Dasar untuk rekomendasi pengelolaan spesifik per cluster.
- Memudahkan penyuluhan karena kelompok lahan serupa dapat disatukan.

Interpretasi Semantik: LLM dapat mendeskripsikan setiap cluster: *"Cluster 2 (lahan masam) meliputi 30% sampel di Sumatera dan Kalimantan. Karakteristik: pH 4,2–5,0, Al-dd tinggi (>2 cmol/kg), P dan K rendah. Rekomendasi: pengapuran 2–4 ton/ha, pemupukan P dan K tinggi, serta penambahan bahan organik."**

2.4. Geostatistika (Kriging, Co-Kriging)

Teknik: Interpolasi spasial dengan mempertimbangkan autokorelasi dan semivariogram.

Tujuan: Membuat peta sebaran parameter pada area yang tidak tersampel, serta mengestimasi ketidakpastian.

Contoh Kasus:

Dari 500 titik sampel pH di Kabupaten X, dilakukan ordinary kriging untuk menghasilkan peta pH kontinu. Hasil menunjukkan wilayah timur kabupaten memiliki pH <5,0 yang memerlukan pengapuran, sementara wilayah barat pH >6,0.

Dampak:

- Visualisasi tematik untuk perencanaan tata ruang.
- Alokasi bantuan pupuk/kapur yang lebih tepat sasaran.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menulis laporan: *“Peta sebaran pH menunjukkan bahwa 40% lahan di Kabupaten X, terutama di kecamatan timur, tergolong masam (pH <5,0). Daerah ini memerlukan pengapuran dengan dosis 2–3 ton/ha. Kami merekomendasikan alokasi dolomit sebesar 12.000 ton untuk wilayah tersebut.”**

2.5. Analisis Sensitivitas

Teknik: One-at-a-time, metode Morris, sobol.

Tujuan: Mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap output tertentu (misal indeks kesuburan, prediksi produktivitas).

Contoh Kasus:

Dalam model prediksi produktivitas jagung, analisis sensitivitas Sobol menunjukkan bahwa curah hujan menyumbang 45% varians output, diikuti C-org (25%), dan pH (15%). Parameter lain kontribusinya kecil.

Dampak:

- Prioritas pengukuran (fokus pada parameter sensitif).
- Fokus intervensi untuk meningkatkan output.

Interpretasi Semantik: LLM dapat merangkum: *“Produktivitas jagung paling sensitif terhadap curah hujan, diikuti C-organik dan pH. Untuk meningkatkan hasil, prioritas utama adalah memastikan ketersediaan air melalui irigasi atau pemilihan varietas tahan kekeringan, serta meningkatkan bahan organik tanah.”*

2.6. Interpretasi Semantik dengan Generative AI – Pendekatan Lanjut

Untuk metode advance, LLM dapat digunakan untuk:

- **Menjelaskan hasil clustering** dengan narasi yang mudah dipahami.
 - **Menggambarkan peta tematik** dalam bentuk teks.
 - **Menyusun rekomendasi** berdasarkan hasil analisis sensitivitas.
 - **Membantu interpretasi faktor laten** dari PCA dengan memberi label pada komponen.
-

BAB 3 – METODE MACHINE LEARNING

3.1. Random Forest dan Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM)

Teknik: Ensemble learning yang menggabungkan banyak pohon keputusan. Random Forest menggunakan bagging; XGBoost menggunakan boosting dengan regularisasi.

Tujuan: Prediksi variabel target (produktivitas, kelas kesesuaian) dengan akurasi tinggi; identifikasi feature importance.

Contoh Kasus:

Menggunakan data 5.000 titik sampel, model XGBoost dilatih untuk memprediksi produktivitas padi (ton/ha) berdasarkan parameter tanah, iklim, dan manajemen. Model mencapai $R^2 = 0,85$ pada data uji. Feature importance menunjukkan bahwa curah hujan, C-org, dan pH adalah tiga fitur terpenting.

Dampak:

- Prediksi produktivitas yang akurat untuk perencanaan produksi.
- Identifikasi faktor kunci yang perlu ditingkatkan.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menjelaskan: *"Model machine learning menunjukkan bahwa curah hujan adalah faktor terpenting dalam menentukan produktivitas padi. Untuk lahan dengan curah hujan rendah, diperlukan irigasi tambahan. Di sisi lain, peningkatan C-organik dapat meningkatkan produktivitas secara signifikan, terutama pada lahan dengan pH rendah."*

3.2. Support Vector Machine (SVM) dan Neural Network Dasar

Teknik: SVM memisahkan data dengan hyperplane optimal; Neural Network (MLP) menangkap hubungan non-linear.

Tujuan: Klasifikasi (misal sehat vs tidak sehat) atau regresi dengan bentuk hubungan kompleks.

Contoh Kasus:

*SVM dengan kernel radial digunakan untuk mengklasifikasikan lahan menjadi "sesuai" dan "tidak sesuai" untuk kelapa sawit. Akurasi mencapai 92%. Model

mengidentifikasi bahwa kombinasi pH <5,0 dan Al-dd >2 cmol/kg selalu menghasilkan kelas "tidak sesuai".*

Dampak:

- Alat skrining cepat untuk investor.
- Dasar rekomendasi komoditas.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menghasilkan aturan: *"Lahan dengan pH <5,0 dan Al-dd >2 cmol/kg tidak sesuai untuk kelapa sawit. Jika ditemukan kondisi seperti itu, rekomendasikan pengapuran terlebih dahulu sebelum penanaman."*

3.3. Decision Tree dan Rule Extraction

Teknik: CART (Classification and Regression Trees), CHAID, atau pohon keputusan yang dapat diekstrak aturan if-then-else.

Tujuan: Menghasilkan aturan yang mudah diinterpretasi dan dapat diterapkan langsung oleh penyuluh.

Contoh Kasus:

Pohon keputusan untuk klasifikasi kesuburan tanah menghasilkan aturan: Jika pH <5,5 dan Al-dd >2, maka lahan "masam toksik". Jika pH 5,5–7,0 dan P >20 ppm, maka lahan "subur". Aturan ini disusun dalam bentuk bagan sederhana untuk penyuluh.

Dampak:

- Sistem pakar sederhana yang dapat dioperasikan tanpa komputer.
- Mempercepat adopsi rekomendasi.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menyusun manual: *"Panduan untuk penyuluh: 1) Ukur pH dan Al-dd. Jika pH <5,5 dan Al-dd >2 cmol/kg, lahan tergolong masam toksik. Rekomendasi: kapur 2–4 ton/ha. 2) Jika pH 5,5–7,0 dan P >20 ppm, lahan tergolong subur. Cukup pemupukan N sesuai kebutuhan."*

3.4. Time Series Forecasting (LSTM, Prophet)

Teknik: Long Short-Term Memory (LSTM) untuk data deret waktu dengan ketergantungan jangka panjang; Prophet dari Facebook untuk forecasting dengan komponen musiman.

Tujuan: Meramalkan perubahan kesuburan, kebutuhan irigasi, atau produksi 1–5 tahun ke depan.

Contoh Kasus:

Menggunakan data C-org dari 10 tahun pada 100 titik pemantauan, model LSTM dilatih untuk memprediksi C-org 5 tahun ke depan. Hasil menunjukkan bahwa tanpa perubahan pengelolaan, C-org akan turun hingga 1,2% di beberapa lokasi pada tahun 2030.

Dampak:

- Peringatan dini untuk tindakan preventif.
- Perencanaan jangka panjang program konservasi.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menulis: *“Model prediksi menunjukkan bahwa jika praktik pengelolaan saat ini terus berlanjut, kandungan C-organik di lahan sawah X akan turun 0,2% per tahun, mengakibatkan penurunan produktivitas sekitar 10% dalam 5 tahun. Disarankan untuk segera mengadopsi sistem pengembalian jerami dan pupuk organik.”*

3.5. Clustering dengan Algoritma Canggih (DBSCAN, GMM)

Teknik: DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering) mampu menemukan cluster dengan bentuk tidak beraturan dan menangani outlier; Gaussian Mixture Models (GMM) menggunakan pendekatan probabilistik.

Tujuan: Mengidentifikasi zona pengelolaan presisi yang lebih realistis di lapangan.

Contoh Kasus:

Di perkebunan kelapa sawit seluas 500 ha, data pH, P, K, dan KTK diukur pada 200 titik. DBSCAN menemukan 5 zona, bukan grid seragam. Zona 1 (pH 5,0–5,5, P rendah) memerlukan pemupukan P tinggi; zona 2 (pH 4,5–5,0, Al tinggi) memerlukan pengapuran.

Dampak:

- Efisiensi pemupukan karena perlakuan berbeda per zona.
- Penghematan biaya hingga 20–30%.

Interpretasi Semantik: LLM dapat menghasilkan laporan: *“Lahan perkebunan terbagi menjadi 5 zona pengelolaan. Zona 1 seluas 80 ha memiliki pH rendah dan P*

rendah; direkomendasikan aplikasi rock phosphate dan kapur. Zona 2 seluas 120 ha memiliki pH sangat rendah dan Al tinggi; perlu pengapuran 3 ton/ha.”*

3.6. Interpretasi Semantik dengan Generative AI – Pendekatan Model Kompleks

LLM dapat membantu:

- **Menjelaskan feature importance** dari model black-box.
 - **Menerjemahkan aturan pohon keputusan** menjadi bahasa alami.
 - **Menyusun laporan prediksi** yang disesuaikan dengan kebutuhan pengguna (petani, manajer, pejabat).
 - **Membuat visualisasi deskriptif** dari hasil clustering.
-

BAB 4 – METODE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

4.1. Large Language Models (LLM) untuk Analisis Naratif

Teknik: Fine-tuning model bahasa (Llama, Mistral) pada corpus data pertanian Indonesia; atau menggunakan model dasar dengan prompt engineering yang baik.

Tujuan: Menjawab pertanyaan kompleks dalam bahasa alami, menghasilkan ringkasan, membuat laporan, serta menjadi antarmuka antara data dan pengguna.

Contoh Kasus:

Seorang penyuluh bertanya: "Apa penyebab utama rendahnya produktivitas padi di desa X?" Sistem RAG mengambil data INA-VERITY desa X, dokumen panduan budidaya, dan artikel ilmiah. LLM merespons: "Berdasarkan data INA-VERITY, lahan di desa X memiliki pH rata-rata 4,8 dan Al-dd 2,2 cmol/kg, yang menyebabkan toksisitas Al dan menghambat penyerapan hara. Selain itu, C-organik rendah (1,2%). Rekomendasi: lakukan pengapuran 2 ton/ha dan tambahkan pupuk organik 5 ton/ha."

Dampak:

- Akses informasi demokratis, membantu petani dan penyuluh.
- Efisiensi waktu dalam penyusunan laporan.

4.2. Retrieval-Augmented Generation (RAG)

Teknik: Menggabungkan LLM dengan basis pengetahuan eksternal (dokumen teknis, data INA-VERITY, kebijakan). Query di-embedding, dicari chunk relevan di vector database, lalu disisipkan ke prompt LLM.

Tujuan: Memberikan jawaban yang akurat, terkini, dan bersumber, mengurangi halusinasi.

Contoh Kasus:

Seorang petani bertanya melalui aplikasi: "Lahan saya di koordinat ini mau ditanami jagung, pupuknya apa?" Sistem melakukan RAG: mengambil data tanah dari INA-VERITY untuk koordinat tersebut, mengambil panduan pemupukan jagung dari BSIP, lalu LLM menyusun rekomendasi spesifik: "pH 5,2 (agak masam), P rendah, K sedang. Rekomendasi: kapur 500 kg/ha, SP-36 200 kg/ha, KCl 100 kg/ha, Urea 250 kg/ha."

Dampak:

- Rekomendasi presisi dengan sumber yang jelas.
- Kredibilitas tinggi karena dapat diverifikasi.

4.3. Multi-Agent System

Teknik: Beberapa agen AI (data agent, analisis agent, rekomendasi agent, dokumen agent) berkolaborasi dengan protokol komunikasi terstandar (misal Model Context Protocol).

Tujuan: Menyelesaikan tugas kompleks yang membutuhkan berbagai keahlian, seperti menyusun usulan kebijakan atau laporan kelayakan investasi.

Contoh Kasus:

Seorang kepala Bappeda ingin menyusun usulan pengembangan kawasan hortikultura. Multi-agent system bekerja: data agent mengambil data tanah, iklim, infrastruktur; analisis agent menjalankan model kesesuaian untuk cabai dan bawang; rekomendasi agent menyusun rekomendasi komoditas; dokumen agent menyusun laporan dengan peta dan analisis ekonomi; review agent memeriksa konsistensi.

Dampak:

- Otomatisasi tugas yang sebelumnya membutuhkan tim multidisiplin.
- Kecepatan dan konsistensi tinggi.

4.4. Graph Neural Network (GNN)

Teknik: Model neural yang bekerja pada data berstruktur graf (node = titik sampel/lahan, edge = hubungan spasial atau fungsional).

Tujuan: Menangkap dependensi spasial dan relasional yang kompleks, misal pengaruh lahan tetangga terhadap risiko kontaminasi.

Contoh Kasus:

GNN dilatih untuk memprediksi risiko kontaminasi Cd di lahan sawah berdasarkan lokasi terdekat dengan industri, aliran air, dan nilai Cd di lahan sekitarnya. Model mampu mengidentifikasi hotspot potensial dengan akurasi lebih baik daripada interpolasi spasial biasa.

Dampak:

- Deteksi dini kontaminasi.
- Perencanaan zonasi industri dan pertanian yang lebih baik.

4.5. Reinforcement Learning (RL)

Teknik: Agen belajar kebijakan optimal melalui interaksi dengan lingkungan simulasi, dengan reward yang mengencerminkan tujuan (misal keuntungan maksimal).

Tujuan: Menentukan jadwal tanam, rotasi, atau alokasi pupuk yang memaksimalkan hasil jangka panjang.

Contoh Kasus:

RL agent disimulasikan pada model tanah dan iklim di suatu wilayah. Setelah jutaan episode, agen menemukan bahwa rotasi padi-kedelai dengan input organik setiap dua tahun memberikan keuntungan kumulatif tertinggi dalam 10 tahun, meskipun hasil tahun pertama lebih rendah.

Dampak:

- Rekomendasi dinamis yang adaptif terhadap perubahan.
- Optimalisasi keuntungan jangka panjang.

4.6. Interpretasi Semantik dengan Generative AI – Integrasi

LLM dapat menjadi “antarmuka” antara model AI kompleks dengan pengguna:

- **Explainability:** “Mengapa GNN memprediksi lahan ini berisiko kontaminasi?” LLM menerjemahkan bobot attention menjadi narasi.
- **Rekomendasi RL:** LLM menjelaskan kebijakan yang ditemukan RL dalam bahasa sederhana.
- **Multi-agent coordination:** LLM sebagai orchestrator yang memecah tugas dan menyusun hasil akhir.

BAB 5 – AGENDA RISET BERKELANJUTAN,

20 KONSEP USULAN

Agenda riset berikut dirancang sebagai peta jalan bagi pemanfaatan data INA-VERITY secara sistematis dan berkelanjutan. Setiap agenda tidak hanya menghasilkan pengetahuan baru, tetapi juga menjadi landasan bagi kebijakan strategis nasional dan keputusan investasi sektor swasta. Pelaksanaan agenda ini diharapkan melibatkan kolaborasi antara peneliti, akademisi, pemerintah, dan industri.

5.1. Pemetaan Dinamis Indeks Kesehatan Tanah Nasional

Deskripsi Riset

Riset ini bertujuan untuk menghasilkan peta Indeks Kesehatan Tanah (IKT) nasional yang diperbarui setiap tahun, dengan tingkat ketelitian yang semakin tinggi seiring bertambahnya data. Selain peta spasial, riset ini juga menganalisis perubahan IKT antar waktu (temporal) untuk mengidentifikasi daerah yang mengalami degradasi atau perbaikan signifikan.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Pola spasial IKT di seluruh Indonesia pada skala kabupaten/kecamatan.
- Laju perubahan IKT per tahun dan faktor-faktor yang berkorelasi dengan perubahan tersebut.
- Daerah-daerah dengan IKT sangat rendah (hotspot degradasi) dan sangat tinggi (sentra kesuburan).

Teknik Metodologi Riset

- Geostatistika (ordinary kriging, co-kriging dengan data tambahan seperti citra satelit) untuk interpolasi spasial.
- Analisis tren temporal (Mann-Kendall, Sen's slope) untuk setiap titik pemantauan tetap.
- Analisis komponen utama (PCA) untuk mengidentifikasi faktor yang paling mempengaruhi perubahan IKT.

Dampak Strategis

- Pemerintah pusat dan daerah dapat mengalokasikan anggaran rehabilitasi lahan secara tepat sasaran.
- Program pembangunan pertanian (seperti food estate, cetak sawah baru) dapat diarahkan ke daerah dengan IKT tinggi.
- Masyarakat dan investor mendapatkan informasi objektif tentang potensi lahan.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian Pertanian, KLHK, Bappenas, BIG.
- Dinas pertanian provinsi/kabupaten.
- Investor perkebunan dan agribisnis.
- Masyarakat umum melalui portal data terbuka.

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Peraturan Menteri tentang penetapan kawasan lindung pertanian berdasarkan IKT.
- Pedoman alokasi Dana Alokasi Khusus (DAK) bidang pertanian berdasarkan peta IKT.
- Indikator kinerja daerah (IKD) yang memasukkan capaian peningkatan IKT.

Rekomendasi Periode Riset

Tahunan, dengan pembaruan peta setiap bulan Januari (menggunakan data tahun sebelumnya). Analisis tren dilakukan setiap 5 tahun.

5.2. Identifikasi Faktor-Faktor Penentu Produktivitas Padi

Deskripsi Riset

Riset ini bertujuan mengidentifikasi kontribusi relatif masing-masing parameter tanah, iklim, dan manajemen terhadap produktivitas padi nasional. Dengan menggunakan data dari ribuan petak lahan sawah, riset ini akan mengungkap faktor mana yang paling membatasi dan mana yang memiliki potensi peningkatan tertinggi.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Urutan prioritas faktor yang mempengaruhi produktivitas padi (misal: pH, C-org, N, P, K, hara mikro, curah hujan, irigasi, praktik manajemen).
- Nilai ambang kritis untuk setiap faktor yang membatasi produktivitas.

- Perbedaan faktor pembatas antar wilayah agroekosistem (Jawa, Sumatera, Sulawesi, dll).

Teknik Metodologi Riset

- Model machine learning (XGBoost, Random Forest) untuk prediksi produktivitas dan ekstraksi feature importance.
- Analisis sensitivitas (Sobol, Morris) untuk mengukur kontribusi varians.
- Analisis regresi spasial untuk mengakomodasi heterogenitas wilayah.

Dampak Strategis

- Rekomendasi pemupukan menjadi lebih presisi: daerah dengan defisit P mendapat subsidi P, bukan N.
- Program peningkatan produktivitas dapat difokuskan pada faktor pembatas utama.
- Efisiensi anggaran subsidi pupuk yang selama ini tersebar merata.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian Pertanian (Direktorat Jenderal Prasarana dan Sarana Pertanian).
- Petani dan penyuluh.
- Industri pupuk (dapat menyesuaikan produk dengan kebutuhan spesifik daerah).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Revisi pedoman rekomendasi pemupukan (Permentan) berbasis data spesifik lokasi.
- Alokasi subsidi pupuk berdasarkan peta defisit hara dari hasil riset.
- Program peningkatan C-organik untuk daerah dengan faktor pembatas C-org.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 2 tahun (karena pola dapat berubah seiring perubahan iklim dan teknologi). Diperbarui dengan data produktivitas terkini.

5.3. Zonasi Potensi Pengembangan Komoditas Unggulan

Deskripsi Riset

Riset ini bertujuan memetakan kesesuaian lahan untuk komoditas utama (padi, jagung, kedelai, kelapa sawit, kopi, kakao, tebu, dll) dan menghasilkan zonasi yang menjadi acuan pengembangan kawasan sentra produksi.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Peta kesesuaian lahan (S1–S3, N1–N2) untuk masing-masing komoditas di seluruh Indonesia.
- Luas potensi pengembangan per komoditas per kabupaten/provinsi.
- Komoditas unggulan yang paling sesuai untuk setiap daerah.

Teknik Metodologi Riset

- Menentukan parameter kritis dan ambang batas untuk setiap komoditas (berbasis literatur dan pakar).
- Menghitung Indeks Kesesuaian Lahan (IKL) untuk setiap komoditas.
- Overlay peta IKL dengan peta penggunaan lahan, infrastruktur, dan pasar untuk prioritasasi.

Dampak Strategis

- Perencanaan tata ruang yang berbasis potensi lahan (RTRW, RDTR).
- Pengembangan kawasan sentra produksi yang lebih terarah, mengurangi ketimpangan.
- Investor dapat memilih lokasi investasi dengan keyakinan lebih tinggi.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian ATR/BPN (penataan ruang).
- Kementerian Pertanian (pengembangan kawasan).
- Pemerintah daerah (perencanaan pembangunan).
- Investor perkebunan dan agribisnis.

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Penetapan kawasan pertanian pangan berkelanjutan (KP2B) berdasarkan peta kesesuaian.
- Pedoman teknis pengembangan kawasan sentra produksi.
- Insentif fiskal bagi investasi di daerah dengan potensi kesesuaian tinggi.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 3 tahun (karena peta penggunaan lahan dan kebijakan tata ruang dapat berubah). Pembaruan peta kesesuaian dengan data tanah baru.

5.4. Evaluasi Efektivitas Subsidi Pupuk

Deskripsi Riset

Riset ini mengevaluasi apakah subsidi pupuk (Urea, SP-36, KCl, NPK, pupuk organik) selama ini tepat sasaran dan efektif meningkatkan produktivitas. Dengan membandingkan daerah penerima subsidi dengan daerah yang tidak menerima (setelah mengontrol faktor lain), riset ini mengukur dampak kausal subsidi.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Dampak subsidi terhadap peningkatan IKT dan produktivitas per hektar.
- Apakah subsidi lebih efektif di daerah dengan defisit hara tertentu?
- Apakah terdapat kebocoran (subsidi diberikan ke daerah yang tidak membutuhkan)?

Teknik Metodologi Riset

- Quasi-experimental design: difference-in-differences dengan pembanding (control group) menggunakan propensity score matching.
- Regresi dengan variabel instrumental (misal jarak ke pabrik pupuk sebagai instrumen).
- Analisis cost-benefit: nilai tambah produksi dibanding biaya subsidi.

Dampak Strategis

- Efisiensi anggaran subsidi hingga triliunan rupiah per tahun.
- Subsidi dapat diarahkan ke daerah yang benar-benar membutuhkan.
- Meningkatkan daya saing petani karena input lebih efisien.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian Keuangan, Kementerian Pertanian.
- Petani (karena subsidi tepat sasaran).
- Industri pupuk (dapat merancang produk sesuai kebutuhan).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Perubahan skema subsidi dari berbasis kuota menjadi berbasis peta defisit hara.
- Penetapan daerah prioritas penerima subsidi.
- Integrasi data subsidi dengan data INA-VERITY untuk verifikasi lapangan.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap tahun (untuk evaluasi tahun anggaran sebelumnya) dan evaluasi jangka menengah setiap 3 tahun.

5.5. Deteksi Dini Degradasi Lahan

Deskripsi Riset

Riset ini mengembangkan sistem peringatan dini (early warning system) untuk mendeteksi penurunan kesehatan tanah yang signifikan dalam waktu singkat, sehingga tindakan preventif dapat segera dilakukan.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Pola dan karakteristik degradasi cepat (misal: penurunan C-org >0,3%/tahun, peningkatan BD >0,1/tahun).
- Faktor pemicu degradasi cepat (misal: perubahan penggunaan lahan, praktik pengelolaan ekstrem).
- Ambang batas untuk memicu peringatan.

Teknik Metodologi Riset

- Analisis time series pada titik pemantauan tetap: deteksi outlier dan perubahan drastis dengan metode statistik (CUSUM, Bayesian change point).
- Algoritma machine learning (Isolation Forest, LSTM autoencoder) untuk mendeteksi anomali.
- Integrasi data satelit (NDVI, LST) untuk konfirmasi.

Dampak Strategis

- Mencegah degradasi meluas sebelum mencapai titik kritis.
- Menghemat biaya rehabilitasi yang jauh lebih mahal.
- Menjaga produktivitas lahan jangka panjang.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Dinas pertanian dan lingkungan hidup daerah.
- Petani dan perusahaan perkebunan.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (program restorasi).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Standar operasional prosedur (SOP) tanggap darurat degradasi lahan.
- Alokasi dana khusus untuk intervensi cepat di daerah dengan peringatan dini.
- Insentif bagi petani yang menjaga stabilitas IKT.

Rekomendasi Periode Riset

Sistem berjalan kontinu (real-time). Riset pengembangan algoritma dan validasi dilakukan setiap tahun.

5.6. Prediksi Risiko Kekeringan Berbasis Data Tanah

Deskripsi Riset

Riset ini mengintegrasikan data kapasitas menahan air tanah (AWC) dengan prakiraan iklim (curah hujan, suhu) untuk memprediksi risiko kekeringan per musim tanam pada skala kecamatan.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Peta kapasitas menahan air tanah (AWC) skala detail.
- Probabilitas kekeringan pada berbagai skenario iklim.
- Daerah dengan risiko tinggi yang memerlukan adaptasi.

Teknik Metodologi Riset

- Geostatistika untuk interpolasi AWC.
- Model regresi logistik atau random forest dengan target kejadian kekeringan historis.
- Simulasi Monte Carlo untuk skenario iklim.

Dampak Strategis

- Petani dapat memilih varietas tahan kekeringan atau mengatur jadwal tanam.
- Asuransi pertanian dapat menetapkan premi berbasis risiko.
- Pemerintah dapat merencanakan bantuan air (pompa, sumur) di daerah rawan.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Petani di lahan tadah hujan.
- Asuransi pertanian (BUMN dan swasta).
- Dinas pertanian dan BMKG.

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Rekomendasi jadwal tanam nasional berdasarkan prediksi risiko.
- Subsidi pompa irigasi untuk daerah dengan risiko tinggi.

- Penetapan daerah prioritas bantuan benih tahan kekeringan.

Rekomendasi Periode Riset

Prakiraan per musim tanam (April dan Oktober). Riset pembaruan model setiap tahun.

5.7. Analisis Spasial Kontaminasi Logam Berat

Deskripsi Riset

Riset ini mengidentifikasi hotspot kontaminasi logam berat (Cd, Pb, As, Hg) di lahan pertanian serta menganalisis kaitan dengan sumber pencemar (industri, jalan raya, pertambangan, penggunaan pupuk fosfat).

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Peta sebaran konsentrasi logam berat total dan bioavailable.
- Sumber pencemar dominan per wilayah.
- Luas lahan yang tidak layak untuk pertanian pangan.

Teknik Metodologi Riset

- Spatial clustering (DBSCAN, Getis-Ord G_i^*) untuk identifikasi hotspot.
- Geographically Weighted Regression (GWR) untuk melihat hubungan dengan sumber pencemar.
- Analisis risiko kesehatan (Hazard Quotient, Cancer Risk) berbasis data konsumsi pangan.

Dampak Strategis

- Perlindungan kesehatan masyarakat dengan melarang produksi pangan di lahan tercemar berat.
- Penetapan zona penyangga antara industri dan lahan pertanian.
- Mendorong remediasi lahan tercemar.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian Kesehatan, KLHK, Kementerian Pertanian.
- Dinas kesehatan dan lingkungan hidup daerah.
- Petani di daerah tercemar (mendapat informasi untuk beralih ke non-pangan).

- Masyarakat konsumen.

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Penetapan baku mutu tanah pertanian yang lebih ketat.
- Peraturan zonasi industri dan pertanian.
- Program remediasi lahan tercemar dengan dana tanggung jawab perusahaan.

Rekomendasi Periode Riset

Baseline setiap 5 tahun, dengan pemantauan tahunan di daerah hotspot. Riset sumber pencemar dilakukan setiap 2 tahun.

5.8. Pemodelan Dampak Perubahan Iklim terhadap Kesesuaian Lahan

Deskripsi Riset

Riset ini mensimulasikan bagaimana perubahan iklim (suhu, curah hujan, frekuensi kekeringan) pada skenario RCP 4.5 dan 8.5 akan mengubah kesesuaian lahan untuk komoditas utama Indonesia pada horizon waktu 2030, 2050, dan 2080.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Pergeseran zona kesesuaian komoditas akibat perubahan iklim.
- Daerah yang akan kehilangan kesesuaian dan daerah yang mendapat peluang baru.
- Rekomendasi adaptasi (pergantian komoditas, perubahan jadwal tanam, investasi infrastruktur).

Teknik Metodologi Riset

- Menggabungkan proyeksi iklim dari model CMIP6 (dengan ensemble) dengan model kesesuaian lahan IKL.
- Simulasi dampak pada produktivitas menggunakan model tanaman (DSSAT, APSIM) atau pendekatan statistik.
- Analisis kerentanan (vulnerability) dengan mempertimbangkan kapasitas adaptasi daerah.

Dampak Strategis

- Perencanaan pertanian jangka panjang yang antisipatif.

- Menghindari investasi yang tidak sesuai di masa depan.
- Membantu Indonesia dalam menyusun Nationally Determined Contributions (NDC) untuk sektor pertanian.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian Pertanian, Bappenas, KLHK.
- Pemerintah daerah.
- Investor perkebunan jangka panjang.
- Lembaga donor dan mitra internasional.

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Rencana Induk Adaptasi Perubahan Iklim Sektor Pertanian.
- Pedoman pemilihan varietas adaptif.
- Program asuransi pertanian berbasis iklim.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 5 tahun (menyesuaikan dengan keluaran IPCC terbaru). Simulasi diperbarui dengan skenario emisi terkini.

5.9. Optimasi Alokasi Pupuk Organik dan Anorganik

Deskripsi Riset

Riset ini menggunakan teknik pembelajaran penguatan (reinforcement learning) untuk menemukan kombinasi dosis pupuk organik dan anorganik yang memaksimalkan keuntungan jangka panjang petani dengan mempertimbangkan dinamika kesuburan tanah.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Kombinasi optimal pupuk organik dan anorganik untuk setiap jenis tanah dan komoditas.
- Trade-off antara keuntungan jangka pendek dan jangka panjang.
- Dampak kebijakan subsidi terhadap optimalisasi.

Teknik Metodologi Riset

- Membangun environment simulasi berdasarkan data historis (respon tanaman terhadap pemupukan, dinamika kesuburan).
- Melatih agen RL (misal Proximal Policy Optimization) untuk memilih aksi pemupukan setiap musim.
- Validasi dengan uji lapangan pada petak percobaan.

Dampak Strategis

- Petani dapat meningkatkan efisiensi pemupukan hingga 30–40%.
- Mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia dan dampak lingkungan.
- Meningkatkan keuntungan petani secara berkelanjutan.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Petani (pengguna langsung).
- Industri pupuk (dapat mengembangkan produk kombinasi).
- Kementerian Pertanian (perumusan rekomendasi).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Revisi rekomendasi pemupukan spesifik lokasi dengan mempertimbangkan pupuk organik.
- Program subsidi pupuk organik terintegrasi.
- Sertifikasi petani yang menerapkan kombinasi optimal.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 3 tahun, dengan uji lapangan berkelanjutan.

5.10. Segmentasi Petani Berbasis Data

Deskripsi Riset

Riset ini mengelompokkan petani berdasarkan praktik pengelolaan dan kondisi lahan mereka, sehingga penyuluhan dapat disesuaikan secara lebih efektif.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Tipologi petani (misal: petani inovatif, petani konvensional, petani dengan lahan marginal, petani dengan lahan subur).
- Karakteristik setiap segmen dan hambatan adopsi teknologi.

- Strategi pendekatan yang paling efektif per segmen.

Teknik Metodologi Riset

- Clustering (K-Means, GMM) pada data riwayat manajemen dan skor pilar.
- Analisis diskriminan untuk mengidentifikasi faktor pembeda.
- Uji coba pendekatan penyuluhan berbeda pada segmen yang berbeda.

Dampak Strategis

- Penyuluhan lebih efisien karena materi disesuaikan.
- Meningkatkan adopsi teknologi rekomendasi.
- Mempercepat peningkatan produktivitas nasional.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Penyuluh pertanian.
- Petani (mendapat pendampingan yang relevan).
- Kementerian Pertanian (efisiensi program penyuluhan).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Pedoman penyuluhan berbasis segmentasi petani.
- Penetapan indikator kinerja penyuluh yang mengakomodasi segmentasi.
- Alokasi anggaran pelatihan berdasarkan segmen prioritas.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 5 tahun (karena tipologi petani dapat berubah). Diperbarui dengan data sensus pertanian.

5.11. Korelasi Antara Kesehatan Tanah dan Pendapatan Petani

Deskripsi Riset

Riset ini menghubungkan data IKT (Indeks Kesehatan Tanah) dengan data pendapatan petani dari BPS atau survei khusus, untuk membuktikan secara ekonomi bahwa perbaikan tanah meningkatkan kesejahteraan.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Elastisitas pendapatan terhadap IKT.
- Ambang IKT minimal agar petani mencapai garis kemiskinan.
- Perbedaan dampak antar komoditas.

Teknik Metodologi Riset

- Regresi spasial (spatial lag model) dengan data agregat desa.
- Analisis panel data jika tersedia data longitudinal.
- Analisis cost-benefit investasi perbaikan tanah.

Dampak Strategis

- Memperkuat advokasi bahwa investasi kesehatan tanah adalah investasi ekonomi.
- Membantu prioritas program pengentasan kemiskinan di pedesaan.
- Memberikan dasar bagi lembaga keuangan untuk menawarkan kredit perbaikan tanah.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Bappenas, Kementerian Desa, Kementerian Pertanian.
- Bank dan lembaga pembiayaan.
- Petani (melalui program yang lebih tepat).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Integrasi IKT dalam indeks kemiskinan multidimensi.
- Program kredit lunak untuk perbaikan tanah (pengapuran, pupuk organik).
- Penetapan target peningkatan IKT dalam RPJMN sebagai indikator kesejahteraan.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 5 tahun (sinkron dengan periode RPJMN). Diperbarui dengan data sensus ekonomi pertanian.

5.12. Pengembangan Indeks Ketahanan Pangan Lokal

Deskripsi Riset

Riset ini membangun indeks komposit yang mengintegrasikan IKT, produktivitas, akses pasar, infrastruktur, dan faktor sosial untuk mengukur ketahanan pangan di tingkat kabupaten/kecamatan.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Peringkat ketahanan pangan daerah berdasarkan data objektif.
- Faktor pembatas utama ketahanan pangan per daerah.
- Skenario intervensi yang paling efektif.

Teknik Metodologi Riset

- PCA atau weighted average dengan pembobotan dari AHP (Analytic Hierarchy Process).
- Overlay spasial dan analisis sensitivitas.
- Uji validasi dengan data kejadian rawan pangan.

Dampak Strategis

- Alokasi bantuan pangan dan program ketahanan pangan lebih tepat sasaran.
- Pemantauan ketahanan pangan secara real-time.
- Membantu pencapaian target SDG 2 (zero hunger).

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Badan Ketahanan Pangan (Kementan), Bappenas.
- Pemerintah daerah.
- LSM yang bergerak di bidang ketahanan pangan.

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Penetapan daerah prioritas penanganan kerawanan pangan.
- Indikator kinerja ketahanan pangan daerah.
- Pedoman penyusunan rencana aksi ketahanan pangan berbasis data.

Rekomendasi Periode Riset

Tahunan (update dengan data baru), dengan evaluasi metodologi setiap 3 tahun.

5.13. Validasi dan Kalibrasi Metode Cepat (PUTS, Sensor)

Deskripsi Riset

Riset ini menggunakan data INA-VERITY (hasil analisis laboratorium standar) sebagai

acuan untuk mengkalibrasi dan memvalidasi metode uji cepat, seperti PUTS (Perangkat Uji Tanah Sawah), sensor spektroskopi NIR, atau sensor elektrokimia.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Akurasi dan presisi metode cepat dibandingkan metode standar.
- Faktor koreksi untuk masing-masing metode dan kondisi tanah.
- Biaya dan waktu yang dihemat dengan metode cepat.

Teknik Metodologi Riset

- Pengambilan sampel berpasangan: analisis metode standar dan metode cepat pada sampel yang sama.
- Regresi linear dan non-linear untuk mengembangkan model kalibrasi.
- Analisis error (RMSE, MAE, bias) dan validasi silang.

Dampak Strategis

- Metode cepat yang terkalibrasi dapat digunakan untuk survei massal dengan biaya rendah.
- Mempercepat akuisisi data nasional.
- Membuka peluang penggunaan sensor lapangan oleh petani dan penyuluh.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Peneliti dan laboratorium.
- Petani dan penyuluh (menggunakan alat cepat).
- Pemerintah (efisiensi survei).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk metode cepat tanah.
- Sertifikasi alat uji cepat yang terkalibrasi.
- Program pelatihan penggunaan alat cepat untuk penyuluh.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 2 tahun, dengan penambahan data dari berbagai jenis tanah. Kalibrasi ulang setiap ada teknologi baru.

5.14. Analisis Efisiensi Irigasi Berdasarkan Kapasitas Menahan Air

Deskripsi Riset

Riset ini mengelompokkan lahan berdasarkan kapasitas menahan air (AWC) dan tekstur untuk merekomendasikan jenis irigasi yang paling efisien (tetes, sprinkler, padi sawah, atau tadah hujan).

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Peta AWC detail per kecamatan.
- Kebutuhan air per komoditas dan per jenis tanah.
- Potensi penghematan air dengan irigasi yang sesuai.

Teknik Metodologi Riset

- Interpolasi AWC dari data titik sampel.
- Simulasi neraca air dengan model (FAO Penman-Monteith).
- Analisis biaya-manfaat berbagai sistem irigasi.

Dampak Strategis

- Efisiensi penggunaan air irigasi (sumber daya kian langka).
- Mengurangi risiko gagal panen akibat kekeringan.
- Membantu perencanaan investasi infrastruktur irigasi.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian PUPR (irigasi).
- Dinas pertanian dan pengairan daerah.
- Petani (efisiensi biaya air).
- Perusahaan perkebunan.

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Rekomendasi jenis irigasi per zona dalam rencana pembangunan irigasi.
- Subsidi teknologi irigasi hemat air untuk daerah dengan AWC rendah.
- Penetapan tarif air irigasi berdasarkan efisiensi.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 3 tahun (sinkron dengan pembangunan infrastruktur). Diperbarui dengan data penggunaan lahan.

5.15. Pembangunan Sistem Peringatan Dini Hama dan Penyakit

Deskripsi Riset

Riset ini mengintegrasikan data tanah (misal kelembaban, C-org, pH) dengan data kejadian hama/penyakit untuk memprediksi risiko serangan secara dini.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Faktor tanah yang berkorelasi dengan kejadian hama/penyakit (misal: kelembaban tinggi dengan blast padi, pH rendah dengan penyakit layu).
- Model prediksi risiko per musim tanam.
- Ambang batas untuk memicu peringatan.

Teknik Metodologi Riset

- Analisis korelasi dan regresi logistik antara parameter tanah dan kejadian hama/penyakit.
- Random forest untuk prediksi risiko dengan fitur tanah, iklim, dan manajemen.
- Integrasi data dari dinas pertanian dan laporan petani.

Dampak Strategis

- Petani dapat melakukan tindakan pencegahan sebelum serangan meluas.
- Mengurangi penggunaan pestisida (karena hanya digunakan saat diperlukan).
- Meningkatkan produksi dan stabilitas hasil.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Petani dan penyuluh.
- Dinas pertanian (pengendalian OPT).
- Industri pestisida (dapat merancang produk sesuai kebutuhan).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Sistem peringatan dini nasional untuk OPT.
- Pedoman pengendalian OPT berbasis risiko.
- Program asuransi tanaman yang mempertimbangkan risiko OPT.

Rekomendasi Periode Riset

Model berjalan real-time (peringatan per musim). Riset pengembangan model setiap 2 tahun.

5.16. Analisis Dampak Program Perbaikan Tanah terhadap Produktivitas

Deskripsi Riset

Riset ini mengevaluasi program perbaikan tanah seperti pengapuran massal, pembagian pupuk organik, atau olah tanah konservasi yang telah dilaksanakan oleh pemerintah atau swasta, menggunakan data sebelum-sesudah (baseline dan endline).

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Efektivitas program dalam meningkatkan IKT dan produktivitas.
- Faktor yang mempengaruhi keberhasilan program (misal: dosis, pendampingan, kondisi awal).
- Nilai ekonomi (return on investment) program.

Teknik Metodologi Riset

- Quasi-experimental design dengan kelompok kontrol (non-peserta).
- Difference-in-differences dengan data panel.
- Analisis biaya-manfaat.

Dampak Strategis

- Memastikan anggaran publik digunakan secara efektif.
- Memberikan umpan balik untuk perbaikan desain program.
- Meningkatkan akuntabilitas dan transparansi.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian Pertanian, Bappenas, Kementerian Keuangan.
- Pemerintah daerah.
- Petani (program menjadi lebih baik).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Standar desain dan implementasi program perbaikan tanah.
- Indikator kinerja program berbasis outcome.
- Mekanisme evaluasi berkala wajib untuk program bersubsidi.

Rekomendasi Periode Riset

Setelah program selesai (1–2 tahun setelah implementasi). Untuk program berkelanjutan, evaluasi setiap 3 tahun.

5.17. Studi Keterkaitan Antara Variabilitas Tanah dan Keberlanjutan Usaha Tani

Deskripsi Riset

Riset ini mengkaji bagaimana variabilitas antar lahan (dalam satu petani atau antar petani) mempengaruhi adopsi teknologi, stabilitas pendapatan, dan keberlanjutan usaha tani.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Tingkat variabilitas tanah dalam satu unit lahan (CV) dan dampaknya terhadap produktivitas.
- Hubungan antara variabilitas dan adopsi teknologi presisi.
- Dampak variabilitas terhadap risiko gagal panen.

Teknik Metodologi Riset

- Analisis statistik deskriptif (CV, range) data titik sampel dalam satu lahan.
- Regresi dengan data panel petani (variabilitas sebagai prediktor).
- Analisis survival untuk keberlanjutan usaha.

Dampak Strategis

- Mendorong adopsi pengelolaan presisi (zona pengelolaan) untuk lahan variabel.
- Membantu perumusan produk asuransi yang mempertimbangkan variabilitas.
- Meningkatkan stabilitas pendapatan petani.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Petani dan perusahaan perkebunan.
- Asuransi pertanian.

- Kementerian Pertanian (program pengelolaan lahan).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Pedoman zonasi pengelolaan lahan berbasis variabilitas.
- Program subsidi alat untuk pemetaan lahan (GPS, sensor).
- Produk asuransi dengan premi berdiferensiasi berdasarkan tingkat variabilitas.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 5 tahun, dengan data dari berbagai tipe lahan.

5.18. Pengembangan Model Prediksi Harga Komoditas Berbasis Data Tanah dan Iklim

Deskripsi Riset

Riset ini menggabungkan prediksi produksi dari model INA-VERITY (IPP) dengan data pasar untuk memprediksi harga komoditas beberapa bulan ke depan.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Hubungan antara produksi yang diprediksi dengan harga pasar.
- Faktor non-produksi (impor, stok) yang mempengaruhi harga.
- Akurasi prediksi harga untuk berbagai komoditas.

Teknik Metodologi Riset

- Model time series (SARIMA, Prophet) dengan input produksi yang diprediksi dan variabel ekonomi makro.
- Machine learning (XGBoost) untuk menangkap non-linearitas.
- Validasi dengan data harga historis.

Dampak Strategis

- Petani dapat memilih waktu panen yang optimal (menghindari panen raya yang menurunkan harga).
- Pemerintah dapat merencanakan impor/ekspor secara lebih akurat.
- Stabilisasi harga pangan nasional.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Petani dan koperasi.
- Kementerian Perdagangan, Bulog, Kementerian Pertanian.
- Pelaku pasar (pedagang, industri pengolahan).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Sistem informasi harga pertanian terintegrasi dengan prediksi.
- Kebijakan impor/ekspor yang responsif terhadap prediksi surplus/defisit.
- Program cadangan pangan yang lebih terencana.

Rekomendasi Periode Riset

Prediksi diperbarui setiap bulan. Riset pengembangan model setiap 2 tahun.

5.19. Analisis Kesiapan Lahan untuk Program Food Estate

Deskripsi Riset

Riset ini mengidentifikasi lahan potensial untuk program food estate (lahan pangan skala besar) berdasarkan kriteria kesesuaian lahan (IKL), ketersediaan air, akses infrastruktur, dan risiko bencana.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Peta kesesuaian lahan untuk food estate komoditas padi, jagung, kedelai.
- Luas lahan potensial dan estimasi investasi yang diperlukan.
- Prioritas lokasi berdasarkan analisis multi-kriteria.

Teknik Metodologi Riset

- Multi-criteria decision analysis (MCDA) dengan pembobotan AHP.
- Overlay spasial (peta tanah, iklim, hidrologi, infrastruktur, konservasi).
- Analisis risiko (banjir, kekeringan, konflik lahan).

Dampak Strategis

- Menghindari kegagalan program food estate seperti yang terjadi di masa lalu.
- Memastikan investasi pemerintah tepat sasaran.
- Menjaga lahan konservasi dan hutan tidak terkonversi.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian Pertanian, Kementerian ATR/BPN, KLHK.
- Pemerintah daerah.
- Investor (jika skema kerja sama).

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Penetapan lokasi food estate nasional berdasarkan kajian ilmiah.
- Standar kelayakan lahan untuk program food estate.
- Mekanisme pengawasan dan evaluasi berkala.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap kali ada rencana food estate baru. Pembaruan peta potensi setiap 3 tahun.

5.20. Kajian Integrasi Data Tanah dengan Data Kesehatan Masyarakat

Deskripsi Riset

Riset ini menghubungkan data kontaminasi tanah (logam berat) dengan data kesehatan masyarakat (stunting, keracunan, penyakit ginjal, dll) di wilayah yang sama, untuk mengidentifikasi risiko kesehatan akibat pencemaran tanah.

Fundamental Knowledge yang Ingin Didapatkan

- Hubungan spasial antara hotspot kontaminasi dan kejadian penyakit.
- Dosis respons (exposure-response) dari konsumsi pangan yang ditanam di lahan tercemar.
- Estimasi beban penyakit yang dapat diatribusikan ke kontaminasi tanah.

Teknik Metodologi Riset

- Spatial epidemiology: overlay peta kontaminasi dan peta kejadian penyakit (dari Dinas Kesehatan).
- Regresi Poisson atau logistik dengan kovariat sosio-demografi.
- Analisis biaya kesehatan akibat kontaminasi.

Dampak Strategis

- Bukti ilmiah untuk kebijakan pengendalian pencemaran yang lebih ketat.
- Perlindungan kesehatan masyarakat, terutama anak-anak (stunting).

- Dasar untuk program remediasi lahan tercemar yang berdampak pada kesehatan.

Stakeholder yang Merasakan Dampak

- Kementerian Kesehatan, KLHK, Kementerian Pertanian.
- Dinas kesehatan dan lingkungan hidup daerah.
- Masyarakat di sekitar sumber pencemar.

Jenis Policy/Kebijakan yang Dapat Dirumuskan

- Penetapan baku mutu tanah berdasarkan risiko kesehatan.
- Program monitoring kesehatan masyarakat di daerah hotspot kontaminasi.
- Integrasi data kontaminasi tanah dalam sistem surveilans penyakit.

Rekomendasi Periode Riset

Setiap 5 tahun, dengan pemantauan berkelanjutan di daerah dengan risiko tinggi.

Penutup Bab 5

Dua puluh agenda riset di atas dirancang untuk mencakup spektrum yang luas: dari pemanfaatan dasar data (pemetaan) hingga aplikasi kebijakan tingkat tinggi (food estate, kesehatan). Dengan menjalankan agenda-agenda ini secara berkelanjutan, Indonesia tidak hanya akan memiliki data tanah yang kaya, tetapi juga mampu menerjemahkan data tersebut menjadi kebijakan nyata yang meningkatkan kesejahteraan petani, efisiensi anggaran negara, dan keberlanjutan lingkungan.

Pelaksanaan agenda ini membutuhkan kolaborasi aktif antara Agri Sentinel (sebagai pengelola data), kementerian/lembaga, pemerintah daerah, universitas, dan sektor swasta. Hasil riset harus dipublikasikan secara terbuka (open access) dan diintegrasikan ke dalam sistem perencanaan pembangunan nasional.

BAB 6 – PANDUAN MENUMBUHKAN KEJELIAN RISET

Kejelian riset (*research acumen*) adalah kemampuan untuk melihat peluang di balik data, mempertanyakan asumsi, dan merumuskan pertanyaan-pertanyaan baru yang tidak terpikirkan sebelumnya. Dalam konteks INA-VERITY, kejelian riset tidak hanya berarti mahir menggunakan metode statistik atau machine learning, tetapi juga mampu **membaca cerita di balik angka, menghubungkan temuan lintas disiplin, dan menerjemahkan hasil riset menjadi rekomendasi yang berdampak**. Bab ini disusun sebagai panduan untuk menumbuhkan, menajamkan, dan terus meningkatkan kejelian riset bagi para peneliti, akademisi, analis kebijakan, dan praktisi data sains yang bekerja dengan data INA-VERITY.

6.1. Membangun “Data Mindset”

6.1.1. Data Bukan Sekadar Angka

Data INA-VERITY adalah representasi numerik dari realitas lapangan: tanah, petani, tanaman, dan lingkungan. Setiap angka memiliki konteks. Seorang peneliti yang memiliki *data mindset* tidak akan pernah memperlakukan data sebagai entitas abstrak, tetapi selalu bertanya:

- *Apa yang terjadi di lapangan saat nilai ini diambil?*
- *Apakah ada kejadian khusus (banjir, kekeringan, pemupukan berlebih) yang menjelaskan nilai ekstrem?*
- *Bagaimana jenis tanah, topografi, dan sejarah lahan mempengaruhi angka ini?*

6.1.2. Asumsi Adalah Musuh Kejelian

Banyak peneliti terjebak pada asumsi yang tidak diuji. Contoh asumsi yang sering muncul:

- “Tanah vulkanik selalu subur.” (Padahal beberapa Andisol memiliki fiksasi P tinggi yang membatasi produktivitas.)
- “Semakin tinggi C-organik, semakin baik.” (Padahal pada tanah gambut, C-organik > 20% justru menimbulkan masalah pengelolaan air.)
- “pH netral adalah yang terbaik untuk semua tanaman.” (Padahal kelapa sawit tumbuh optimal pada pH 4,5–5,5.)

Kejelian riset dimulai dengan **mempertanyakan setiap asumsi** dan mengujinya dengan data.

6.1.3. Pola, Bukan Hanya Rata-rata

Rata-rata (mean) seringkali menutupi variasi yang penting. Dua lahan bisa memiliki IKT rata-rata 0,6, tetapi yang satu memiliki variasi rendah (homogen) dan yang lain variasi tinggi (heterogen). Implikasi kebijakannya sangat berbeda: lahan homogen cukup satu rekomendasi, lahan heterogen memerlukan zonasi. Kejelian riset berarti **melihat distribusi data, bukan hanya nilai tengahnya**.

6.2. Teknik Membangkitkan Pertanyaan Kritis

6.2.1. Pendekatan 5W+1H

Setiap temuan harus dipertanyakan dengan 6 pertanyaan dasar:

Pertanyaan	Contoh Penerapan
<i>What</i> (apa yang terjadi?)	IKT di Kabupaten X turun 15% dalam 3 tahun.
<i>Why</i> (mengapa?)	Apakah karena perubahan penggunaan lahan? Penurunan curah hujan? Peningkatan intensitas pestisida?
<i>When</i> (kapan?)	Apakah penurunan terjadi bertahap atau tiba-tiba setelah kejadian tertentu?
<i>Where</i> (di mana?)	Apakah penurunan merata atau hanya di kecamatan tertentu? Apakah berkorelasi dengan jarak dari jalan raya/industri?

Pertanyaan	Contoh Penerapan
<i>Who</i> (siapa yang terpengaruh?)	Petani di wilayah mana yang paling terdampak? Apakah ada perbedaan berdasarkan luas lahan?
<i>How</i> (bagaimana mekanismenya?)	Parameter mana yang berubah: pH, C-org, atau AI-dd? Apakah ada hubungan sebab akibat?

6.2.2. Pendekatan Faktor Pembatas (Limiting Factor)

Dalam agronomi, produktivitas ditentukan oleh faktor yang paling membatasi (hukum Liebig). Kejelian riset berarti **mengidentifikasi faktor pembatas** dari data.

- Langkah 1: Identifikasi parameter dengan skor terendah di suatu lahan atau wilayah.
- Langkah 2: Tanyakan: "Jika faktor ini dinaikkan ke nilai ideal, berapa peningkatan produktivitas yang dapat dicapai?"
- Langkah 3: Bandingkan dengan biaya intervensi. Manakah intervensi dengan rasio biaya-manfaat terbaik?

Contoh: Di suatu wilayah, pH (skor 0,3) dan P-tersedia (skor 0,2) keduanya rendah. Mana yang lebih prioritas? Hitung sensitivitas: jika pH naik 0,5, P-tersedia akan naik karena P terfiksasi pada pH rendah. Maka prioritas adalah pengapuran, baru kemudian pemupukan P.

6.2.3. Pendekatan Kontras (Extreme Groups)

Ambil 10% lahan dengan IKT tertinggi dan 10% dengan IKT terendah. Bandingkan parameter-parameter mereka. Parameter apa yang paling membedakan? Ini sering mengungkap faktor-faktor yang tidak terlihat dalam analisis korelasi biasa karena efek non-linear.

Contoh: Mungkin IKT tinggi tidak selalu berkorelasi dengan C-org tinggi, tetapi selalu berkorelasi dengan kombinasi pH 6–7 dan C-org >2% dan P >20 ppm. Pendekatan kontras membantu menemukan interaksi antar parameter.

6.2.4. Pendekatan Outlier

Outlier (nilai ekstrem) sering dianggap sebagai kesalahan dan dibuang. Padahal, outlier bisa menjadi **penemuan paling berharga**.

- *Apakah outlier ini kesalahan pengukuran?* Periksa ulang protokol sampling dan analisis.

- *Jika bukan kesalahan, apa yang menyebabkan nilai ini sangat berbeda?* Mungkin ada praktik pertanian unik, kondisi geologi khusus, atau kontaminasi.
- *Dapatkah outlier ini menginspirasi inovasi?* Contoh: outlier dengan produktivitas sangat tinggi meskipun kondisi tanah biasa-biasa saja bisa mengindikasikan adanya praktik manajemen yang belum terdokumentasi.

6.2.5. Pendekatan Temporal: Sebelum vs Sesudah

Jika data INA-VERITY telah terkumpul dalam beberapa periode, bandingkan kondisi sebelum dan sesudah suatu peristiwa (kebijakan, bencana, perubahan harga).

- *Difference-in-differences*: bandingkan perubahan di daerah terdampak dengan daerah kontrol yang tidak terdampak.
 - *Event study*: lihat apakah ada lonjakan atau penurunan yang signifikan setelah peristiwa.
-

6.3. Membangun Koneksi Lintas Disiplin

Kejelian riset tidak berkembang dalam silo disiplin. Data INA-VERITY sangat kaya untuk dihubungkan dengan bidang lain.

6.3.1. Hubungkan dengan Ekonomi

- *Pertanyaan*: Apakah peningkatan IKT berkorelasi dengan peningkatan pendapatan petani? Berapa elastisitasnya?
- *Data yang diperlukan*: Data pendapatan petani (BPS, survei khusus).
- *Metode*: Regresi panel, analisis korelasi spasial.
- *Dampak*: Menjadikan investasi kesehatan tanah sebagai prioritas ekonomi, bukan sekadar lingkungan.

6.3.2. Hubungkan dengan Sosiologi

- *Pertanyaan*: Mengapa petani di lahan dengan IKT rendah tetap enggan mengadopsi teknologi perbaikan tanah?
- *Data yang diperlukan*: Data karakteristik petani (umur, pendidikan, akses informasi, keanggotaan kelompok tani).
- *Metode*: Regresi logistik, analisis faktor, wawancara kualitatif.
- *Dampak*: Desain program penyuluhan yang lebih efektif dan kontekstual.

6.3.3. Hubungkan dengan Kesehatan Masyarakat

- Pertanyaan: Apakah daerah dengan kontaminasi logam berat tinggi memiliki prevalensi stunting atau penyakit ginjal yang lebih tinggi?
- Data yang diperlukan: Data kesehatan dari Dinas Kesehatan (surveilans penyakit).
- Metode: Spatial epidemiology, regresi Poisson.
- Dampak: Bukti untuk kebijakan pengendalian pencemaran berbasis kesehatan.

6.3.4. Hubungkan dengan Ilmu Politik dan Kebijakan

- Pertanyaan: Apakah alokasi bantuan pupuk lebih banyak ke daerah dengan IKT rendah? Atau justru ke daerah dengan kekuatan politik?
- Data yang diperlukan: Data alokasi subsidi (realisasi), data politik (DPR, pilkada).
- Metode: Analisis regresi dengan variabel politik.
- Dampak: Mendorong tata kelola yang lebih transparan dan berbasis kebutuhan.

6.3.5. Hubungkan dengan Ilmu Lingkungan dan Hidrologi

- Pertanyaan: Bagaimana hubungan antara IKT dan kualitas air sungai (sedimen, nutrien) di DAS yang sama?
- Data yang diperlukan: Data kualitas air dari KLHK atau BBWS.
- Metode: Analisis spasial, regresi DAS.
- Dampak: Pengelolaan DAS terpadu yang mempertimbangkan kesehatan tanah.

6.4. Eksplorasi “Out of the Box” – Melampaui Kebiasaan

6.4.1. Analisis Temporal Terbalik (Reverse Time Analysis)

Kebanyakan riset melihat data dari masa lalu ke masa depan. Coba lakukan sebaliknya: mulai dari kondisi saat ini, lalu telusuri ke belakang.

- Contoh: Identifikasi lahan yang saat ini memiliki IKT sangat tinggi. Kemudian lihat data 5 atau 10 tahun lalu. Apa yang berubah? Apakah ada intervensi khusus (pupuk organik massal, pengapuran, pergantian komoditas)?
- Dampak: Menemukan resep keberhasilan yang dapat direplikasi.

6.4.2. Analisis Spasial yang Tidak Biasa

Selain korelasi dengan jarak ke industri atau jalan, coba korelasikan IKT dengan:

- Jarak ke pasar (apakah petani yang dekat pasar cenderung lebih intensif? Apakah meningkatkan atau menurunkan IKT?)
- Kepadatan penduduk (apakah urbanisasi mempengaruhi praktik pertanian?)

- Sejarah konflik lahan (apakah lahan yang pernah disengketakan memiliki IKT lebih rendah?)
- Data budaya (misal: daerah dengan tradisi “lebaran” tertentu mungkin memiliki pola tanam berbeda).

6.4.3. Pemanfaatan Data Non-Tradisional

Jangan batasi diri pada data INA-VERITY saja. Integrasikan dengan:

- **Data media sosial:** Sentimen petani terhadap pupuk atau benih baru.
- **Data harga pasar harian** dari aplikasi e-commerce.
- **Data citra satelit dengan resolusi tinggi** (dari drone atau komersial) untuk melihat detail lahan.
- **Data cuaca real-time** dari stasiun BMKG.
- **Data mobilitas petani** dari GPS atau ponsel (anonim).

Contoh: Dengan menggabungkan data IKT dengan data sentimen Twitter tentang pupuk, peneliti dapat mendeteksi daerah yang mengalami kelangkaan pupuk lebih awal.

6.4.4. Pendekatan Sistem (System Thinking)

Jangan lihat tanah sebagai entitas terisolasi. Lihat sebagai bagian dari sistem yang lebih besar:

- **Sistem hidrologi:** Tanah di hulu mempengaruhi sedimentasi dan kualitas air di hilir.
- **Sistem sosial-ekonomi:** Kebijakan harga pupuk mempengaruhi intensitas pemupukan, yang mempengaruhi IKT.
- **Sistem rantai pasok:** Permintaan pasar terhadap produk organik mendorong perbaikan tanah.

Dengan pendekatan sistem, peneliti dapat mengidentifikasi *leverage points*: intervensi kecil di satu titik yang menghasilkan dampak besar di seluruh sistem.

6.4.5. Analisis “What-If” Ekstrem (Skenario Ujung-Ujung)

Alih-alih hanya melihat skenario moderat, lakukan simulasi skenario ekstrem:

- Apa yang terjadi jika subsidi pupuk dihapuskan sepenuhnya?
- Apa yang terjadi jika semua petani di suatu wilayah mengadopsi praktik pertanian organik?
- Apa yang terjadi jika curah hujan turun 50% selama 5 tahun berturut-turut? Skenario ekstrem membantu mengidentifikasi kerentanan sistem dan merancang strategi adaptasi yang tangguh.

6.4.6. Membalik Pertanyaan (Inverse Question)

Biasanya kita bertanya: "Parameter apa yang mempengaruhi produktivitas?" Coba balik: "Petani dengan produktivitas tertinggi memiliki karakteristik apa yang *tidak* dimiliki petani produktivitas rendah?" Atau: "Di lahan dengan IKT tinggi, parameter apa yang *tidak* berkorelasi dengan produktivitas?" Pertanyaan terbalik sering mengungkap hal-hal yang tidak terpikirkan.

6.5. Membangun Kolaborasi dan Siklus Belajar

6.5.1. Data Club – Forum Diskusi Rutin

Bentuk forum yang mempertemukan peneliti dari berbagai disiplin (ilmu tanah, agronomi, ekonomi, data sains, kebijakan) secara rutin (misal dua mingguan). Setiap sesi membahas satu temuan atau satu pertanyaan riset. Aturannya: tidak ada pertanyaan yang bodoh, semua disiplin dihormati.

- Manfaat: Memperkaya perspektif, mencegah *silo thinking*, memicu ide-ide baru.

6.5.2. Hackathon Data INA-VERITY

Selenggarakan kompetisi tahunan di mana tim lintas disiplin berlomba menemukan insight paling menarik atau membangun model prediktif paling akurat dari data INA-VERITY.

- Hadiah: Pendanaan untuk riset lanjutan, publikasi bersama, atau implementasi kebijakan.
- Output: Kode, laporan, prototipe dashboard, dan yang terpenting, semangat kolaborasi.

6.5.3. Publikasi Terbuka dan Reproduksibilitas

Kejelian riset akan berkembang pesat jika hasil riset dipublikasikan secara terbuka (open access) beserta kode dan data anonim. Prinsip *reproducible research*: orang lain harus dapat mengulang analisis dan mendapatkan hasil yang sama.

- Platform: GitHub, Zenodo, atau repositori institusi.
- Manfaat: Umpan balik dari komunitas global, koreksi kesalahan, dan akselerasi inovasi.

6.5.4. Magang Riset Terbalik (Reverse Internship)

Undang petani, penyuluh, atau pejabat daerah untuk "magang" di tim peneliti selama beberapa hari. Mereka akan melihat bagaimana data diolah dan memberikan

perspektif lapangan yang sering terlewat. Sebaliknya, peneliti akan belajar tentang realitas di lapangan. Ini membangun empati dan relevansi riset.

6.5.5. Siklus Belajar: Observasi → Hipotesis → Eksperimen → Validasi

Kejelian riset bukanlah bakat bawaan, tetapi keterampilan yang diasah. Ikuti siklus ini:

1. **Observasi:** Lihat data, temukan anomali atau pola menarik.
2. **Hipotesis:** Ajukan penjelasan sementara.
3. **Eksperimen:** Rancang analisis atau uji lapangan untuk menguji hipotesis.
4. **Validasi:** Konfirmasi atau revisi hipotesis.
5. **Publikasi:** Bagikan temuan, lalu kembali ke observasi.

Dengan mengulang siklus ini, kejelian riset akan terus meningkat.

6.6. Contoh Penerapan Kejelian Riset dalam INA-VERITY

Contoh 1: Menemukan Hubungan Tak Terduga

- **Observasi:** Di Kabupaten X, IKT cenderung lebih tinggi di lahan yang *tidak* mendapatkan subsidi pupuk.
- **Asumsi awal:** Subsidi seharusnya meningkatkan IKT.
- **Pertanyaan kritis:** Mengapa terjadi sebaliknya?
- **Penyelidikan:** Ternyata petani penerima subsidi cenderung memupuk berlebihan (over-fertilization), yang menurunkan pH dan aktivitas mikroba. Petani non-subsidi lebih efisien.
- **Kesimpulan:** Subsidi pupuk harus disertai dengan pendampingan teknis untuk menghindari over-fertilization.
- **Kebijakan:** Syarat penerima subsidi adalah mengikuti pelatihan pemupukan berimbang.

Contoh 2: Outlier yang Menginspirasi

- **Observasi:** Satu titik sampel di lahan sawah menunjukkan IKT 0,9 (sangat baik) sementara titik di sekitarnya rata-rata 0,5.
- **Pertanyaan:** Apa yang berbeda?
- **Penyelidikan:** Ternyata titik outlier itu adalah lahan petani yang secara konsisten menggunakan pupuk organik dari kotoran sapi dan tidak pernah menggunakan pestisida kimia.

- **Kesimpulan:** Praktik organik dapat meningkatkan IKT secara signifikan bahkan di lahan yang sebelumnya biasa-biasa saja.
- **Rekomendasi:** Program percontohan pertanian organik didanai untuk melihat dampak skala lebih luas.

Contoh 3: Hubungan Lintas Disiplin

- **Observasi:** Daerah dengan IKT rendah juga memiliki prevalensi stunting anak tinggi.
 - **Pertanyaan:** Apakah ada hubungan kausal?
 - **Penyelidikan:** IKT rendah → produktivitas rendah → pendapatan petani rendah → daya beli pangan bergizi rendah → stunting. Juga kemungkinan kontaminasi logam berat di tanah yang sama mempengaruhi kesehatan anak.
 - **Kesimpulan:** Perbaikan tanah tidak hanya penting untuk produksi pangan, tetapi juga untuk kesehatan generasi mendatang.
 - **Kebijakan:** Integrasi program perbaikan tanah dengan program gizi nasional.
-

6.7. Mengukur dan Meningkatkan Kejelian Riset

6.7.1. Indikator Kejelian Riset

- Jumlah pertanyaan riset baru yang dihasilkan dari satu dataset.
- Jumlah kolaborasi lintas disiplin yang terjalin.
- Jumlah publikasi yang mengutip data INA-VERITY.
- Jumlah rekomendasi kebijakan yang diadopsi berdasarkan riset.
- Jumlah peneliti muda yang menunjukkan kemampuan merumuskan hipotesis sendiri.

6.7.2. Pelatihan Kejelian

- Workshop "Mempertanyakan Data" dengan studi kasus INA-VERITY.
- Mentoring oleh peneliti senior yang memiliki reputasi kejelian tinggi.
- Program "Research Sprint" di mana tim diberi data dan waktu 48 jam untuk menghasilkan 10 pertanyaan riset baru.

6.7.3. Membudayakan Kejelian

Kejelian bukan hanya keterampilan individu, tetapi budaya organisasi. Agri Sentinel harus menciptakan lingkungan yang:

- **Menghargai pertanyaan**, bukan hanya jawaban.

- **Memberi ruang untuk eksperimen gagal** (kegagalan adalah sumber pembelajaran).
 - **Mendorong keberanian** untuk menantang asumsi lama.
 - **Merayakan temuan tak terduga**, meskipun tidak langsung menghasilkan kebijakan.
-

6.8. Penutup Bab 6

Kejelian riset adalah jantung dari inovasi berbasis data. Data INA-VERITY yang kaya dan multidimensional adalah lahan subur bagi peneliti yang berani mempertanyakan, menghubungkan, dan melompat keluar dari kebiasaan. Panduan dalam bab ini tidak dimaksudkan sebagai aturan kaku, tetapi sebagai **kerangka untuk terus berlatih**. Semakin sering Anda mempraktikkan teknik-teknik di atas, semakin tajam kejelian Anda. Dan dengan kejelian yang tajam, setiap baris data INA-VERITY akan berbicara – tidak hanya tentang tanah, tetapi tentang masa depan pertanian, kesejahteraan petani, dan keberlanjutan bangsa.

Selamat mengeksplorasi, bertanya, dan menemukan.

BAB 7 – PENUTUP: MENGUNDANG PARTISIPASI DALAM REVOLUSI DATA PERTANIAN

7.1. Refleksi: Dari Tanah ke Data, dari Data ke Kebijakan

Perjalanan panjang yang telah kita lalui bersama dalam dokumen ini—dari pengantar urgensi, enam pilar penilaian, empat indeks strategis, infrastruktur teknologi, kecerdasan artifisial, hingga agenda riset berkelanjutan dan panduan menumbuhkan kejelian—hanyalah awal dari sebuah gerakan besar. **INA-VERITY bukanlah sekadar framework teknis.** Ia adalah cermin yang memantulkan kondisi tanah Indonesia, kompas yang menunjuk arah perbaikan, dan panggung di mana para ilmuwan, pembuat kebijakan, petani, dan pemangku kepentingan lainnya bertemu untuk bekerja sama membangun pertanian yang tangguh, berkelanjutan, dan berkeadilan.

Data yang terkumpul—dari jutaan titik sampel, puluhan parameter, lintas waktu dan ruang—adalah **aset nasional yang tak ternilai.** Namun data tanpa aksi hanya akan menjadi angka mati. Dokumen ini telah menyediakan peta jalan metodologi, agenda riset unggulan, serta semangat kejelian untuk mengubah data menjadi wawasan, wawasan menjadi kebijakan, dan kebijakan menjadi dampak nyata di lapangan.

7.2. Ajakan untuk Berpartisipasi: Peran Setiap Pemangku Kepentingan

INA-VERITY adalah milik kita bersama. Tidak ada satu pihak pun yang dapat mewujudkan visi ini sendirian. Mari kita wujudkan gotong royong nasional dalam data pertanian.

7.2.1. Kepada Peneliti dan Akademisi

Anda adalah ujung tombak penemuan. Dengan kejelian yang telah diasah, Anda dapat menggali pertanyaan-pertanyaan baru yang belum pernah terpikirkan, mengembangkan metodologi inovatif, dan menghasilkan publikasi yang tidak hanya meningkatkan reputasi akademik tetapi juga menyelamatkan petani dari kebangkrutan, melindungi lingkungan, dan memberi masukan kebijakan yang berbasis bukti.

Aksi nyata yang dapat dilakukan:

- Akses data INA-VERITY untuk riset Anda (melalui mekanisme yang disediakan Agri Sentinel).
- Kolaborasi dengan peneliti lintas disiplin (ilmu tanah, agronomi, ekonomi, kesehatan, data sains, kebijakan).
- Publikasikan hasil riset secara terbuka (open access) dan bagikan kode analisis untuk reproduksibilitas.
- Libatkan mahasiswa pascasarjana dalam agenda riset unggulan (bab 5) sebagai bagian dari tesis atau disertasi.

7.2.2. Kepada Pembuat Kebijakan (Pemerintah Pusat dan Daerah)

Anda memiliki kekuatan untuk menerjemahkan temuan riset menjadi regulasi, program, dan alokasi anggaran yang tepat sasaran. Dengan data INA-VERITY, Anda tidak lagi bekerja dalam kegelapan. Setiap keputusan dapat diuji, dievaluasi, dan disempurnakan.

Aksi nyata yang dapat dilakukan:

- Jadikan INA-VERITY sebagai salah satu sumber data resmi dalam perencanaan pembangunan (RPJMN, RPJMD, Renstra K/L).
- Gunakan peta IKT dan IKL untuk menentukan lokasi food estate, alokasi subsidi pupuk, dan prioritas rehabilitasi lahan.
- Integrasikan hasil riset (bab 5) ke dalam kebijakan sektoral: pertanian, lingkungan, tata ruang, kesehatan, ekonomi.
- Alokasikan anggaran untuk pendampingan petani berdasarkan segmentasi hasil riset.

7.2.3. Kepada Sektor Swasta (Perkebunan, Pupuk, Asuransi, Perbankan, Teknologi)

Data INA-VERITY adalah peluang bisnis yang berkelanjutan. Anda dapat mengembangkan produk dan layanan yang tidak hanya menguntungkan secara finansial tetapi juga berkontribusi pada pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Aksi nyata yang dapat dilakukan:

- Gunakan data IKL dan IPP untuk memilih lokasi investasi perkebunan dengan risiko rendah.
- Kembangkan produk pupuk spesifik lokasi berdasarkan peta defisit hara dari hasil riset.
- Tawarkan asuransi pertanian dengan premi berbasis risiko (menggunakan prediksi kekeringan, hama, atau kontaminasi).
- Sediakan platform teknologi (aplikasi mobile, sensor) yang terintegrasi dengan data INA-VERITY untuk petani.
- Dukung pendanaan akuisisi data melalui skema CSR atau kemitraan publik-swasta.

7.2.4. Kepada Lembaga Swadaya Masyarakat dan Organisasi Petani

Anda adalah suara petani dan penjaga keadilan. Dengan data INA-VERITY, advokasi Anda menjadi lebih kuat karena berbasis bukti, bukan sekadar opini.

Aksi nyata yang dapat dilakukan:

- Gunakan peta IKT dan kontaminasi untuk mengadvokasi perlindungan lahan subur dari alih fungsi atau penolakan industri berisiko.
- Bantu petani memahami data lahan mereka sendiri melalui pelatihan dan pendampingan.
- Monitor kebijakan pemerintah (subsidi, food estate) dengan membandingkan alokasi aktual dan peta kebutuhan.
- Dorong transparansi data dan partisipasi publik dalam pengambilan keputusan pertanian.

7.2.5. Kepada Petani dan Masyarakat Pedesaan

Anda adalah pemilik dan pengelola lahan. Data INA-VERITY hadir untuk membantu Anda membuat keputusan yang lebih baik: pupuk apa yang tepat, kapan menanam, komoditas apa yang paling menguntungkan, dan bagaimana menjaga tanah tetap sehat untuk anak cucu.

Aksi nyata yang dapat dilakukan:

- Manfaatkan aplikasi mobile INA-VERITY (yang akan dikembangkan) untuk mengecek kondisi lahan Anda.
- Ikuti penyuluhan berbasis data yang diselenggarakan oleh dinas pertanian atau kelompok tani.

- Bagikan riwayat pengelolaan lahan Anda (pupuk, rotasi, pestisida) untuk memperkaya data.
 - Laporkan jika menemukan kejanggalan (misal: lahan tetangga yang subur tapi hasil rendah) untuk diteliti lebih lanjut.
-

7.3. Visi Masa Depan: Indonesia 2035

Bayangkanlah Indonesia di tahun 2035, satu dekade setelah whitepaper ini diterbitkan:

- **Peta IKT nasional** diperbarui setiap tahun, dapat diakses publik secara gratis, dan menjadi rujukan semua pemangku kepentingan.
- **Subsidi pupuk** tidak lagi tersebar merata, tetapi dialokasikan berdasarkan peta defisit hara yang dihasilkan dari riset tahunan. Efisiensi anggaran mencapai Rp 20 triliun per tahun, yang dialihkan untuk pembangunan irigasi dan riset varietas unggul.
- **Food estate** tidak lagi gagal karena lokasi dipilih dengan analisis multi-kriteria berbasis data INA-VERITY. Produksi padi, jagung, dan kedelai meningkat 30% tanpa perlu membuka lahan baru.
- **Petani di daerah terpencil** dapat mengakses rekomendasi pemupukan presisi melalui ponselnya, dalam bahasa daerahnya, dengan antarmuka yang sederhana. Pendapatan petani meningkat rata-rata 40%.
- **Kontaminasi logam berat** terpetakan, dan lahan berisiko tinggi tidak lagi ditanami padi. Pemerintah daerah menyediakan alternatif tanaman non-pangan atau program remediasi. Prevalensi stunting di daerah sekitar industri menurun drastis.
- **Asuransi pertanian** berbasis data tanah dan iklim menjadi produk yang diminati. Petani yang lahannya berisiko tinggi mendapat premi lebih rendah karena mitigasi telah dilakukan, bukan sebaliknya.
- **Peneliti muda Indonesia** diakui dunia karena publikasi berbasis data INA-VERITY, dengan metodologi yang inovatif dan dampak nyata. Kolaborasi internasional dengan negara tropis lain (Brasil, Kongo, Thailand) terbangun.

Itu bukan utopia. Itu adalah masa depan yang dapat kita capai jika kita mulai hari ini.

7.4. Peran Agri Sentinel sebagai Katalis dan Penjaga

Agri Sentinel, sebagai badan swasta nasional yang mengelola INA-VERITY, berkomitmen untuk:

- **Menjaga kualitas data** dengan standar tertinggi, protokol baku, dan audit berkala.
- **Memastikan akses data yang adil** (gratis untuk publik dan akademisi, berbayar untuk komersial dengan skema yang wajar).
- **Mengembangkan platform teknologi** yang terus meningkat, dengan antarmuka yang ramah pengguna, dan integrasi dengan sistem lain (pemerintah, swasta).
- **Memfasilitasi kolaborasi** antara peneliti, pembuat kebijakan, dan swasta melalui forum, workshop, dan hackathon.
- **Melaporkan secara transparan** setiap tahun capaian, tantangan, dan rencana ke depan.

Namun, Agri Sentinel tidak dapat bekerja sendiri. Kami mengundang Anda semua untuk menjadi **bagian dari gerakan ini**.

7.5. Penutup: Dari Tanah yang Sehat, Bangkitlah Pertanian Berkelanjutan

Ada pepatah lama: *"Tanah adalah ibu, yang memberi kehidupan tanpa pamrih."* Namun, ibu pun perlu dirawat. INA-VERITY adalah wujud perawatan itu: dengan ilmu, data, dan teknologi, kita memahami apa yang diperlukan tanah, apa yang merusaknya, dan bagaimana memulihkannya.

Dokumen ini bukan akhir, melainkan **awal dari percakapan yang terus berlanjut**. Mari kita jadikan INA-VERITY sebagai fondasi bagi pertanian Indonesia yang tangguh, berkeadilan, dan berkelanjutan. Mari kita buktikan bahwa dengan data, kita dapat melompat lebih jauh.

**Tanah sehat, pangan kuat, Indonesia maju.
Sekarang, mari kita bekerja.**

Jakarta, 2026

Elwin Ardirianto, Founder Agri Sentinel

Badan Swasta Nasional Pengelola Data dan Informasi Tanah Indonesia

LAMPIRAN (terpisah)

- Glosarium istilah statistik, ML, AI
- Daftar pustaka dan sumber referensi
- Panduan akses data INA-VERITY
- Kontak person untuk kolaborasi dan partisipasi

Akhir Dokumen