

METODOLOGI KOMPREHENSIF INA-VERITY

Panduan Teknis Perhitungan Skor Pilar, Indeks, Agregasi Spasial, dan Analisis Lanjutan

Dipersiapkan oleh:

Elwin Ardirianto, founder Agri Sentinel

Badan Swasta Nasional Pengelola Data dan Informasi Tanah Indonesia

Jakarta, 2026

Daftar Isi

- **Bab 1 – Teknik Skoring dan Formula Skoring per Pilar 1 s.d. 6**
- **Bab 2 – Teknik Formula Penyusunan Nilai Akhir Indeks untuk Sebuah Lahan**
- **Bab 3 – Agregasi dan Sintesis Nilai Indeks dari Lahan-lahan dalam Suatu Kewilayahan**
- **Bab 4 – Analisis Spatio-Temporal Data Pilar dan Indeks di Kewilayahan**
- **Bab 5 – Analisis Skenario Simulasi (What-If) Data Pilar dan Indeks**
- **Bab 6 – Validasi dan Kalibrasi Model: Memastikan Akurasi Skoring dan Indeks**
- **Bab 7 – Rekomendasi Implementasi Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Dashboard Spasial**
- **Bab 8 – Etika dan Tata Kelola Data INA-VERITY: Privasi, Transparansi, dan Akuntabilitas**
- **Bab 9 – Contoh Perhitungan INA-VERITY**

BAB 1 – TEKNIK SKORING DAN FORMULA SKORING PER PILAR 1 s.d. 6

1.1. Pendahuluan: Prinsip Umum Skoring

Setiap parameter tanah, iklim, dan manajemen diukur dalam satuan asli (pH, ppm, cmol/kg, % dll). Agar dapat dibandingkan dan diagregasi, nilai asli harus dikonversi ke **skor standar 0 – 1** melalui fungsi skoring. Skor 1 = kondisi sangat baik/ideal; skor 0 = sangat buruk/tidak sesuai.

Tiga fungsi dasar:

- **MIB (More is Better)** – semakin tinggi nilai, semakin baik.
- **LIB (Less is Better)** – semakin rendah nilai, semakin baik.
- **OIB (Optimum is Better)** – terdapat rentang nilai ideal.

Selain itu, untuk parameter manajemen digunakan **skoring subjektif** berdasarkan kelas kualitatif, dan beberapa parameter (pH, Bulk Density) mendapat **koreksi jenis tanah** (ambang batas berbeda menurut sub-grup).

Setiap parameter dalam satu pilar diberi **bobot** yang mencerminkan kontribusi relatifnya terhadap kesehatan atau kesuburan tanah dalam pilar tersebut. Bobot ditentukan melalui kajian pakar, literatur, dan akan divalidasi dengan data lapangan. Total bobot per pilar = 100%.

Skor pilar = jumlah dari (skor parameter × bobot proporsional).

Jika ada parameter yang tidak diukur (missing data), bobotnya tidak diikutsertakan, dan bobot parameter yang tersedia diproporsionalkan ulang agar total 100% (lihat Bab 1.8).

1.2. Pilar 1 – Fisika Tanah

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi Skoring	Ambang / Rentang Ideal (skor = 1)	Keterangan
1	Tekstur	15	OIB (khusus)	Liat 20–35%, Debu 30–50%, Pasir 30–50%	Skor = 1 jika dalam segitiga ideal; turun linear mendekati 0 jika 100% pasir atau 100% liat.
2	Bulk Density (BD)	12	LIB (koreksi jenis tanah)	Andisol: $\leq 1,0$; Ultisol: $\leq 1,4$; Vertisol: $\leq 1,2$; Lainnya: $\leq 1,3$ g/cm ³	Skor = 1 jika \leq ambang; turun linear menjadi 0 pada ambang +0,4.
3	Porositas Total	10	OIB	50 – 60%	Skor = 1 di 55%; turun linear ke 0 di 40% dan 70%.
4	Kapasitas Menahan Air Tersedia (AWC)	10	MIB	$> 0,15$ cm ³ /cm ³ (ideal 0,20)	Skor = (nilai – 0,05) / (0,20 – 0,05), dibatasi 0–1.
5	Stabilitas Agregat	8	MIB	$> 60\%$ (sangat stabil)	Skor = nilai / 80%, maks 1.
6	Infiltrasi (Ksat)	10	OIB	2 – 10 cm/jam	Skor = 1 di 2–10; turun linear ke 0 di 0,5 dan 30.

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi Skoring	Ambang / Rentang Ideal (skor = 1)	Keterangan
7	Kedalaman Efektif	15	MIB	>100 cm (ideal 150 cm)	Skor = nilai / 150, maks 1.
8	Salinitas (EC) – kondisional	5	LIB	<2 dS/m (padi), <1 (jagung), <0,5 (hortikultura)	Hanya untuk lahan pesisir/pasang surut. Skor = 1 jika ≤ ambang; turun linear ke 0 pada 2× ambang.
9	Redox (Eh) – kondisional	5	OIB	+200 hingga +400 mV	Hanya untuk lahan sawah. Skor = 1 di 200–400; turun ke 0 di <0 atau >700.

Formula skor Pilar Fisika (SF) untuk satu lahan:

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^m (bobot'_i \times skor_i)}{\sum_{i=1}^m bobot'_i} \times 100\%$$

(dengan proporsionalisasi jika ada missing)

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^m (bobot'_i \times skor_i) \times 100\%}{\sum_{i=1}^m bobot'_i}$$

Namun lebih praktis: hitung bobot proporsional untuk parameter yang tersedia, lalu:

$$SF = \sum_{i \in \text{tersedia}} \left(\frac{\text{bobot}_i}{\sum_{j \in \text{tersedia}} \text{bobot}_j} \times \text{skor}_i \right)$$

$$SF = \sum_{i \in \text{tersedia}} \left(\frac{\text{bobot}_i}{\sum_{j \in \text{tersedia}} \text{bobot}_j} \times \text{skor}_i \right)$$

Hasil SF adalah angka antara 0 dan 1 (atau 0–100 jika dikalikan 100).

Pada indeks agregasi nanti, SF digunakan dalam bentuk 0–1.

1.3. Pilar 2 – Kimia Tanah

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi	Ambang Ideal (skor = 1)	Catatan
1	pH (koreksi jenis tanah)	8	OIB	Andisol:5,5–6,5; Ultisol:5,8–6,8; Vertisol:6,0–7,5; lainnya:6,0–7,0	Skor = 1 di rentang; turun linear ke 0 di 4,0 dan 8,5.
2	C-Organik	10	MIB	>2,5% (ideal 4%)	Skor = nilai / 4%, maks 1.
3	N-Total	6	MIB	>0,5% (ideal 0,6%)	Skor = (nilai – 0,1) / (0,6 – 0,1), dibatasi 0–1.
4	P-Tersedia (Bray I/Olsen)	7	MIB	Bray I: >20 ppm; Olsen: > 16 ppm	Skor = (nilai – batas bawah) / (batas atas ideal – batas bawah), batas bawah = 5 ppm (Bray) atau 4 ppm (Olsen).
5	K-Dapat Ditukar	5	MIB	> 1,0 cmol/kg	Skor = (nilai – 0,2) / (1,2 – 0,2), maks 1.
6	Ca-Dapat Ditukar	5	MIB	>4,0 cmol/kg (ideal 6)	Skor = nilai / 6, maks 1.

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi	Ambang Ideal (skor = 1)	Catatan
7	Mg-Dapat Ditukar	5	MIB	> 1,0 cmol/kg (ideal 2)	Skor = nilai / 2, maks 1.
8	S-Tersedia	4	MIB	> 10 ppm (ideal 15)	Skor = nilai / 15, maks 1.
9	KTK	5	MIB	> 25 cmol/kg (ideal 30)	Skor = nilai / 30, maks 1.
10	Kejenuhan Basa (KB)	4	MIB	> 50% (ideal 80%)	Skor = nilai / 80, maks 1.
11	Al-dd	5	LIB	< 1,0 cmol/kg (tidak toksik)	Skor = 1 jika $\leq 0,5$; turun linear ke 0 di $\geq 4,0$.
12	C/N Ratio	3	OIB	10 – 15	Skor = 1 di 10–15; turun linear ke 0 di 5 dan 30.
13	Zn, Fe, Mn, Cu, B, Mo	@ 3–4	MIB	Zn > 1, Fe > 50, Mn > 20, Cu > 0,5, B > 0,3, Mo > 0,2	Skor = nilai / ambang_ideal (dengan batas maks 1). Total bobot hara mikro sekitar 20%.

Formula skor Pilar Kimia (SK):

$$SK = \sum_{i \in \text{tersedia}} \left(\frac{bobot_i}{\sum bobot_{tersedia}} \times skor_i \right)$$

$$SK = \sum_{i \in \text{tersedia}} \left(\frac{bobot_i}{\sum bobot_{tersedia}} \times skor_i \right)$$

Parameter kondisional (hara mikro) hanya diukur jika ada indikasi defisiensi; jika tidak, parameter tersebut tidak dimasukkan dalam perhitungan.

1.4. Pilar 3 – Biologi Tanah

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi	Ambang Ideal (skor = 1)	Catatan
1	POXC (Karbon Aktif)	20	MIB	>700 mg/kg (ideal 1000)	Skor = nilai / 1000, maks 1.
2	Respirasi Tanah	15	MIB	>200 mg CO ₂ /kg/hari (ideal 300)	Skor = nilai / 300, maks 1.
3	N-Mineralisasi Potensial	15	MIB	>50 mg N/kg/minggu (ideal 80)	Skor = nilai / 80, maks 1.
4	Aktivitas Fosfatase	10	MIB	>200 µg PNP/g/jam (ideal 300)	Skor = nilai / 300, maks 1.
5	Aktivitas Urease	8	MIB	>100 µg NH ₄ /g/jam (ideal 150)	Skor = nilai / 150, maks 1.
6	Aktivitas Dehidrogenase	8	MIB	>100 µg TPF/g/24jam (ideal 150)	Skor = nilai / 150, maks 1.
7	Bakteri Pelarut Fosfat	7	MIB	>10 ⁵ CFU/g (log)	Skor = log ₁₀ (nilai) / 6, maks 1.
8	Bakteri Penambat N	7	MIB	>10 ⁴ CFU/g (log)	Skor = log ₁₀ (nilai) / 5, maks 1.
9	Soil Health Index (SHI)	10	MIB	>0,8 (sangat baik)	Skor = nilai (sudah 0–1).

Formula skor Pilar Biologi (SB):

Sama seperti pilar sebelumnya: rata-rata tertimbang dari parameter yang tersedia dengan bobot proporsional.

1.5. Pilar 4 – Jenis Tanah dan Topografi

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi	Ambang / Skor
1	Klasifikasi Sub-Grup	25	Skor tabel (0–1)	Typic Hapludands=1,0; Typic Hapludults=0,4; Typic Haplosaprists=0,3; dll.
2	Bahan Induk	15	Skor mineralogi (0–1)	Vulkanik intermedier=1,0; aluvial=0,8; batu kapur=0,6; batu pasir=0,4; metamorf=0,2.
3	Kedalaman Solum	15	MIB	> 150 cm =1; 100–150 =0,8; 60–100=0,6; 30–60=0,4; <30=0,2.
4	Drainase Alami	15	OIB	Baik/agak terhambat=1,0; agak cepat/terhambat=0,6; cepat/sangat terhambat=0,2.
5	Kemiringan Lereng	15	LIB	0–3%=1,0; 3–8%=0,9; 8–15%=0,7; 15–30%=0,5; 30–45%=0,2; >45%=0,0.
6	Batuan Permukaan	15	LIB	<5%=1,0; 5–15%=0,8; 15–40%=0,5; 40–80%=0,2; >80%=0,0.

Formula skor Pilar Jenis Tanah (SJ):

Rata-rata tertimbang dari keenam parameter (semua wajib, tidak ada missing karena diperoleh dari peta/profil).

1.6. Pilar 5 – Kebersihan Tanah (Kontaminasi)

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi	Ambang Aman (skor=1)
1	Cd total	12	LIB	<0,3 mg/kg
2	Pb total	12	LIB	<80 mg/kg
3	As total	12	LIB	<25 mg/kg
4	Hg total	8	LIB	<0,3 mg/kg
5	Logam berat bioavailable	12	LIB	Cd<0,1; Pb<5; As<2 mg/kg
6	Residu pestisida	12	LIB	<BMR (0,01–0,1)
7	Mikroplastik	8	LIB	<500 partikel/kg
8	TPH (hidrokarbon)	8	LIB	<100 mg/kg
9	Indikator biologis	8	MIB	Aktivitas enzim >80% kontrol

Setiap parameter diskor 0–1 dengan fungsi LIB atau MIB. Kemudian dihitung **C_{min}** = skor minimum dari semua parameter kontaminasi yang diukur.

Faktor koreksi kontaminasi (Fk) untuk IKT ditentukan dengan pendekatan bertingkat:

- Jika $C_{\min} \geq 0,8 \rightarrow Fk = 1,0$
- Jika $0,5 \leq C_{\min} < 0,8 \rightarrow Fk = 0,7 + 0,3 \times (C_{\min} - 0,5)/0,3$
- Jika $0,2 \leq C_{\min} < 0,5 \rightarrow Fk = 0,3 + 0,4 \times (C_{\min} - 0,2)/0,3$
- Jika $C_{\min} < 0,2 \rightarrow Fk = 0,0$ (tanah tidak layak untuk pangan)

Skor Pilar Kebersihan (SC) tidak diintegrasikan ke IKT sebagai penambah, tetapi digunakan sebagai faktor pengali. Namun untuk keperluan tertentu, skor agregat kontaminasi dapat dihitung sebagai rata-rata tertimbang dari parameter yang diukur.

1.7. Pilar 6 – Agroklimat dan Manajemen

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi	Ambang / Skor Ideal
1	Curah hujan tahunan	10	OIB	1500–2500 mm/th (skor 1)
2	Bulan kering	8	LIB	≤2 bulan
3	Suhu rata-rata	8	OIB	22–28°C
4	Kelembaban relatif	5	OIB	65–75%
5	Radiasi matahari	5	MIB	> 15 MJ/m ² /hari (skor 1)
6	Elevasi	4	OIB (tanaman)	sesuai komoditas
7	Sistem olah tanah	8	subjektif	Zero-tillage=1,0; min till=0,8; konvensional=0,6; over=0,3
8	Bahan organik	10	MIB	> 10 t/ha/th=1,0; 5–10=0,8; 2–5=0,6; <2=0,3; tidak pernah=0
9	Rotasi tanaman	8	subjektif	Diversifikasi tinggi=1,0; sederhana=0,7; monokultur=0,4
10	Pestisida	8	LIB	IPM=1,0; minimal=0,7; intensif=0,3

No.	Parameter	Bobot (%)	Fungsi	Ambang / Skor Ideal
11	Akses irigasi	6	subjektif	Teknis=1,0; sederhana=0,7; tadah hujan=0,4; tidak ada=0

Formula skor Pilar Agroklimat dan Manajemen (SA):

Rata-rata tertimbang dari parameter yang tersedia (untuk parameter iklim dapat diambil dari data eksternal). Hasil SA antara 0–1.

1.8. Penanganan Data Tidak Tersedia (Missing Data)

Jika suatu parameter tidak diukur, **parameter tersebut tidak diikutsertakan** dalam perhitungan skor pilar. Bobotnya didistribusikan secara proporsional ke parameter lain yang tersedia. Ambang minimal data tersedia per pilar: minimal 70% dari total bobot (kecuali Pilar 4 yang wajib lengkap). Jika kurang, skor pilar dinyatakan tidak valid (null).

Contoh: Pada Pilar 2, jika hara mikro tidak diukur (total bobot 20% missing), maka bobot parameter yang tersedia (total 80%) diproporsionalkan menjadi 100% dengan membagi setiap bobot dengan 0,8. Skor pilar dihitung dari parameter yang tersedia dengan bobot proporsional tersebut.

BAB 2 – TEKNIK FORMULA PENYUSUNAN NILAI AKHIR INDEKS UNTUK SEBUAH LAHAN

2.1. Indeks Kesehatan Tanah (IKT)

Tujuan: Mengukur kondisi holistik tanah sebagai sistem hidup yang berkelanjutan.

Komponen: Pilar 1 (SF), Pilar 2 (SK), Pilar 3 (SB), Pilar 4 (SJ), dan faktor koreksi kontaminasi (Fk) dari Pilar 5.

Formula dasar (tanpa kontaminasi):

$$IKT_{\text{dasar}} = (0,25 \times SF) + (0,30 \times SK) + (0,30 \times SB) + (0,15 \times SJ)$$

Bobot antar pilar: Fisika 25%, Kimia 30%, Biologi 30%, Jenis Tanah 15%. Bobot ini dapat disesuaikan setelah validasi.

Dengan kontaminasi:

$$IKT_{\text{akhir}} = IKT_{\text{dasar}} \times Fk$$

dengan Fk dihitung dari C_{min} (skor minimum parameter kontaminasi) seperti pada Bab 1.6.

Interpretasi:

IKT 0–0,2 = Sangat Buruk; 0,2–0,4 = Buruk; 0,4–0,6 = Sedang; 0,6–0,8 = Baik; 0,8–1,0 = Sangat Baik.

2.2. Indeks Kesesuaian Lahan (IKL) untuk Suatu Komoditas

Tujuan: Menilai kecocokan lahan untuk jenis tanaman tertentu.

Komponen: Sama dengan IKT dasar, tetapi juga memasukkan faktor pembatas dari parameter yang skornya <0,3 (termasuk parameter iklim dan manajemen yang relevan).

Langkah perhitungan:

1. Hitung skor kesesuaian untuk setiap parameter yang berpengaruh terhadap komoditas target, dengan fungsi skoring yang disesuaikan (misal: pH ideal jagung 5,5–7,0; suhu, curah hujan, dll).
2. Tentukan faktor pembatas kritis:
 - Untuk parameter yang **permanen** (tekstur, drainase, kemiringan, elevasi) → gunakan nilai minimum (min).
 - Untuk parameter yang **dapat diperbaiki** (pH, P, K, C-org) → gunakan rata-rata geometrik atau rata-rata tertimbang dengan penalti jika skor <0,5.
3. $IKL = (\text{rata-rata tertimbang dari skor semua parameter}) \times (\text{faktor penalti dari parameter permanen terburuk})$.

Pendekatan praktis yang direkomendasikan:

$$IKL = \left(\sum w_i \times s_i \right) \times \min(s_{p1}, s_{p2}, \dots, s_{pk})$$

$$IKL = (\sum w_i \times s_i) \times \min(s_{p1}, s_{p2}, \dots, s_{pk})$$

dengan $sp_1 \dots sp_k$ adalah skor parameter permanen yang tidak dapat diperbaiki (tekstur, drainase, kemiringan, elevasi). Jika tidak ada parameter permanen yang membatasi, $\min = 1$.

Kelas kesesuaian:

$IKL \geq 0,85 = S1$ (Sangat Sesuai); $0,60-0,85 = S2$ (Sesuai); $0,40-0,60 = S3$ (Sesuai Marginal); $0,20-0,40 = N1$ (Tidak Sesuai Saat Ini); $<0,20 = N2$ (Tidak Sesuai Permanen).

2.3. Indeks Produktivitas Potensial (IPP)

Tujuan: Memprediksi potensi hasil panen relatif terhadap potensi genetik varietas.

Formula:

$$IPP = IKT_{\text{dasar}} \times (0,6 + 0,4 \times SA) \times Fm$$

$$IPP = IKT_{\text{dasar}} \times (0,6 + 0,4 \times SA) \times Fm$$

- SA = skor Pilar 6 (Agroklimat dan Manajemen) antara 0–1.
- Fm = faktor manajemen tambahan (1,2 untuk manajemen sangat baik; 1,0 baik; 0,8 sedang; 0,6 buruk). Dapat diambil dari sub-parameter manajemen dalam SA.

Interpretasi: $IPP = 0,7 \rightarrow$ potensi hasil 70% dari potensi genetik varietas. Misal varietas padi berpotensi 8 ton/ha, maka prediksi hasil = 5,6 ton/ha.

2.4. Indeks Profitabilitas (IPR)

Tujuan: Menilai kelayakan ekonomi usaha pertanian.

Formula:

$$IPR = \frac{(\text{Harga} \times \text{Potensi hasil} \times IPP) - \text{Biaya perbaikan}}{\text{Biaya total produksi}}$$

$$IPR = ((\text{Harga} \times \text{Potensi hasil} \times IPP) - \text{Biaya perbaikan}) / \text{Biaya total produksi}$$

- **Potensi hasil** = hasil maksimum varietas (ton/ha) dari literatur.
- **Biaya perbaikan** = estimasi biaya untuk menaikkan parameter dengan skor <0,5 (pengapuran, pemupukan, pengolahan, remediasi).
Dihitung menggunakan tabel biaya standar per parameter.
- **Biaya total produksi** = biaya operasional normal (benih, pupuk standar, pestisida, tenaga kerja, sewa lahan) + biaya perbaikan.

Interpretasi:

IPR >2,0 = Sangat Menguntungkan; 1,5–2,0 = Menguntungkan; 1,0–1,5 = Cukup Menguntungkan; 0,5–1,0 = Kurang Menguntungkan; <0,5 = Tidak Menguntungkan.

BAB 3 – AGREGASI DAN SINTESIS NILAI INDEKS DARI LAHAN-LAHAN DALAM SUATU KEWILAYAHAN

3.1. Konsep Dasar Agregasi Spasial

Data INA-VERITY dikumpulkan pada titik-titik sampel (lahan/petak). Untuk keperluan perencanaan wilayah (kecamatan, kabupaten, provinsi), kita perlu mengagregasi nilai indeks dari banyak titik menjadi satu nilai yang mewakili wilayah tersebut. Metode agregasi harus dipilih berdasarkan sifat sebaran data dan tujuan analisis.

Pendekatan umum:

- **Jika data tersebar merata** (setiap unit lahan memiliki satu titik sampel) → rata-rata aritmatika.
- **Jika data tidak merata** (misal: ada lahan yang lebih luas dari yang lain) → rata-rata tertimbang luas lahan.
- **Jika ingin mengetahui kondisi terburuk** (untuk peringatan dini) → nilai minimum.
- **Jika ingin mengetahui potensi tertinggi** → nilai maksimum.
- **Jika ada outlier ekstrem** → median.

3.2. Metode Agregasi untuk Berbagai Indeks

Indeks	Tujuan Agregasi Wilayah	Metode yang Direkomendasikan
IKT (Kesehatan Tanah)	Mengetahui rata-rata kesehatan tanah di wilayah	Rata-rata tertimbang luas (atau rata-rata sederhana jika titik mewakili area sama)
IKL (Kesesuaian komoditas)	Mengetahui proporsi lahan yang sesuai	Hitung persentase luas lahan dengan IKL $\geq 0,4$ (S3 ke atas)
IPP (Produktivitas potensial)	Estimasi total produksi wilayah	Jumlah (IPP \times luas lahan \times potensi hasil varietas)
IPR (Profitabilitas)	Mengetahui kelayakan usaha rata-rata	Median (karena IPR sering tidak terdistribusi normal)

3.3. Agregasi untuk Peta Tematik

Untuk menghasilkan peta kontinu (misal peta IKT kabupaten), gunakan **geostatistika (kriging)** atau interpolasi **Inverse Distance Weighting (IDW)** dari titik-titik sampel. Namun perlu diperhatikan bahwa interpolasi hanya valid jika kerapatan sampel mencukupi dan variasi spasial tidak terlalu ekstrem. Untuk wilayah dengan data sedikit, lebih baik menampilkan peta titik (point map) atau agregat ke unit administrasi.

3.4. Sintesis Multi-Indeks untuk Perencanaan Wilayah

Contoh: Untuk menentukan prioritas intervensi pemerintah di suatu kabupaten, kita dapat membuat **indeks komposit** yang menggabungkan IKT (kesehatan tanah), IPP (produktivitas), dan IPR (profitabilitas). Misal:

$$\text{Prioritas} = w_1 \times (1 - \text{IKT}_{\text{norm}}) + w_2 \times (1 - \text{IPP}_{\text{norm}}) + w_3 \times (1 - \text{IPR}_{\text{norm}})$$

Semakin tinggi nilai prioritas, semakin besar kebutuhan intervensi. Bobot dapat ditentukan dengan AHP (Analytic Hierarchy Process) berdasarkan kebijakan daerah.

BAB 4 – ANALISIS SPATIO-TEMPORAL DATA PILAR DAN INDEKS

4.1. Konsep Analisis Spatio-Temporal

Analisis spatio-temporal menggabungkan dimensi ruang (lokasi) dan waktu (periode pengukuran). Dengan data INA-VERITY yang dikumpulkan secara berkala, kita dapat mendeteksi **perubahan pola** kesehatan tanah, mengidentifikasi **hotspot degradasi**, dan memprediksi **tren masa depan**.

4.2. Teknik Dasar

1. **Peta perbedaan temporal (difference map)** – Kurangi nilai indeks tahun N dengan tahun N-1, tampilkan dalam peta. Warna merah menunjukkan degradasi, hijau perbaikan.
2. **Analisis tren titik (Mann-Kendall)** – Untuk setiap titik sampel tetap, uji apakah ada tren signifikan (naik/turun) selama periode pengamatan.
3. **Spatial clustering of trends** – Kelompokkan titik berdasarkan arah tren (misal: tren naik, stabil, turun) menggunakan cluster spasial.
4. **Hotspot analysis (Getis-Ord G_i^*)** – Identifikasi daerah dengan nilai indeks yang secara signifikan lebih tinggi (hotspot) atau lebih rendah (coldspot) dari rata-rata sekitarnya.

4.3. Contoh Agenda Kajian Spatio-Temporal

No.	Judul Agenda	Deskripsi Singkat
1	Dekade Degradasi: Tren IKT 10 Tahun di Lahan Sawah Jawa	Menggunakan uji Mann-Kendall pada data historis untuk mengetahui daerah dengan penurunan IKT tercepat.
2	Identifikasi Hotspot Perbaikan Kesehatan Tanah	Mencari daerah yang menunjukkan peningkatan IKT signifikan, lalu analisis faktor penyebab (program pemerintah? perubahan manajemen?).

No.	Judul Agenda	Deskripsi Singkat
3	Migrasi Zona Kesesuaian Komoditas Akibat Perubahan Iklim	Bandungkan peta IKL jagung tahun 2025 dan 2035 (dengan proyeksi iklim) untuk melihat pergeseran geografis.
4	Dinamika Kontaminasi Logam Berat di Sekitar Industri	Plot perubahan konsentrasi Cd dan Pb setiap tahun, kaitkan dengan kebijakan lingkungan.
5	Analisis Spatio-Temporal Efektivitas Program Pengapuran	Bandungkan peta pH sebelum dan sesudah program, hitung luas lahan yang berhasil dinaikkan pH-nya.

BAB 5 – ANALISIS SKENARIO SIMULASI (WHAT-IF) DATA PILAR DAN INDEKS

5.1. Konsep Analisis Skenario

Analisis skenario (what-if) bertujuan untuk menjawab pertanyaan: “Bagaimana jika suatu parameter berubah?” atau “Apa dampak dari suatu kebijakan?” Dengan data INA-VERITY, kita dapat membangun model prediktif dan menjalankan simulasi untuk berbagai skenario.

5.2. Pendekatan Simulasi

- **Skenario parameter tunggal:** Ubah nilai suatu parameter (misal: tingkatan C-org dari 1,5% menjadi 3%) pada semua titik, hitung ulang IKT, IPP, IPR, lalu hitung dampak agregat (produksi, keuntungan).
- **Skenario kebijakan:** Simulasikan alokasi subsidi pupuk berdasarkan peta defisit hara, bandingkan dengan skenario subsidi merata.
- **Skenario perubahan iklim:** Gunakan proyeksi suhu dan curah hujan dari model iklim (CMIP6), hitung ulang IKT untuk komoditas utama.

5.3. Contoh Agenda Kajian What-If

No.	Judul Agenda	Deskripsi Singkat
1	Dampak Kenaikan C-Organik 1% terhadap Produktivitas Nasional	Simulasi jika semua lahan sawah ditingkatkan C-org-nya dari rata-rata 1,8% menjadi 2,8%. Hitung tambahan produksi padi.
2	Skenario Penghapusan Subsidi Pupuk: Siapa yang Paling Terdampak?	Simulasi jika subsidi dihapus, maka petani akan membeli pupuk dengan harga pasar. Hitung penurunan IPR per wilayah.

No.	Judul Agenda	Deskripsi Singkat
3	Optimalisasi Alokasi Kapur: Berapa Dosis Terbaik?	Simulasi berbagai dosis pengapuran (0,5; 1; 2; 3 ton/ha) pada lahan masam, hitung peningkatan IKT dan biaya, cari dosis optimal.
4	Adaptasi Perubahan Iklim: Pergeseran Komoditas di Sumatera	Dengan skenario RCP 8.5 tahun 2050, hitung IKL untuk kelapa sawit dan karet, rekomendasikan komoditas alternatif.
5	Dampak Konversi Lahan Gambut menjadi Sawit terhadap IKT	Bandungkan IKT lahan gambut yang masih alami vs yang sudah dikonversi, lalu simulasi jika konversi dihentikan.

BAB 6 – VALIDASI DAN KALIBRASI MODEL: MEMASTIKAN AKURASI SKORING DAN INDEKS

6.1. Pentingnya Validasi

Model skoring dan agregasi INA-VERITY didasarkan pada asumsi dan ambang batas dari literatur. Namun, kondisi lapangan Indonesia mungkin memerlukan penyesuaian. Oleh karena itu, **validasi** dengan data independen (produktivitas aktual, hasil panen petani) wajib dilakukan secara berkala.

6.2. Teknik Validasi

1. **Validasi silang (cross-validation):** Bagi data menjadi set pelatihan dan pengujian. Hitung skor pilar dan indeks pada set pengujian, lalu korelasikan dengan produktivitas aktual. Gunakan R^2 , RMSE, MAE.
2. **Kalibrasi ambang batas:** Jika ditemukan bias sistematis (misal: model memprediksi produktivitas terlalu tinggi), sesuaikan ambang batas fungsi skoring (batas bawah/atas) dengan data lapangan.
3. **Uji sensitivitas bobot:** Ubah bobot antar pilar dalam batas wajar (misal: Kimia $30 \pm 5\%$, Biologi $30 \pm 5\%$) dan lihat perubahan pada korelasi dengan produktivitas. Bobot yang menghasilkan korelasi tertinggi dipilih.

6.3. Rekomendasi Kalibrasi Berkala

- **Setiap 3 tahun** lakukan validasi ulang dengan data produktivitas terbaru.
 - Libatkan petani dan penyuluh dalam pengumpulan data produktivitas aktual sebagai ground truth.
 - Gunakan **model machine learning** (Random Forest) untuk secara otomatis mengekstrak feature importance dari data produktivitas, lalu bandingkan dengan bobot yang ditetapkan.
-

BAB 7 – REKOMENDASI IMPLEMENTASI SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS (SIG) UNTUK DASHBOARD SPASIAL

7.1. Kebutuhan Platform SIG

Agar data dan indeks INA-VERITY dapat diakses dan dianalisis oleh pengguna, diperlukan **dashboard spasial interaktif** dengan fitur:

- Peta dasar (administrasi, topografi, satelit).
- Layer tematik (IKT, IKL, IPP, IPR, masing-masing parameter).
- Kemampuan zoom, klik untuk melihat detail titik sampel.
- Filter waktu (tahun pengukuran).
- Ekspor data dan peta.

7.2. Arsitektur Teknis (Ringkasan)

- **Backend:** Database PostGIS (untuk data spasial), server peta (GeoServer atau MapServer).
- **Frontend:** Library peta (OpenLayers, MapLibre) dengan framework React/Vue.
- **Fitur analisis bawaan:** Hitung agregasi wilayah (kecamatan) secara otomatis, tampilkan histogram, dan buat laporan PDF.

7.3. Contoh Penggunaan

- **Pengguna (kepala dinas):** Buka dashboard, pilih layer "IKT Kabupaten", klik pada kabupaten X → muncul grafik tren IKT 5 tahun terakhir dan perbandingan dengan kabupaten tetangga.
 - **Peneliti:** Unduh data shapefile untuk seluruh parameter di suatu wilayah, lalu analisis dengan perangkat lunak statistik.
-

BAB 8 – ETIKA DAN TATA KELOLA DATA INA-VERITY: PRIVASI, TRANSPARANSI, DAN AKUNTABILITAS

8.1. Prinsip Perlindungan Data Pribadi

Data petani (nama, alamat, koordinat lahan yang spesifik) adalah informasi sensitif. Agri Sentinel wajib:

- **Menganonimkan** data sebelum dipublikasikan atau digunakan untuk riset. Koordinat digeneralisasi ke tingkat desa atau grid 1 km.
- **Meminta persetujuan (informed consent)** dari petani sebelum pengambilan sampel.
- **Tidak menjual data pribadi** kepada pihak ketiga.

8.2. Transparansi Algoritma

Seluruh formula skoring, bobot, dan metode agregasi harus dipublikasikan secara terbuka (open source). Setiap pengguna dapat menelusuri bagaimana suatu indeks dihitung. Hal ini membangun kepercayaan dan memungkinkan perbaikan kolektif.

8.3. Akuntabilitas dan Mekanisme Pengaduan

- **Audit independen** tahunan untuk memastikan kepatuhan terhadap standar.
- **Saluran pengaduan** bagi petani atau masyarakat yang merasa data mereka disalahgunakan.

- **Dewan etik** yang terdiri dari perwakilan pemerintah, akademisi, LSM, dan petani.

8.4. Rekomendasi Kebijakan Data

- Pemerintah sebaiknya menerbitkan **Peraturan Presiden** tentang pengelolaan data tanah nasional yang mengakui INA-VERITY sebagai sistem rujukan.
 - Data agregat (kecamatan ke atas) harus **gratis dan terbuka** untuk publik.
 - Data detail (titik sampel) dapat diakses peneliti dengan perjanjian kerahasiaan.
-

DAFTAR PUSTAKA (contoh)

- FAO. (2018). *Guide on Soil Health Assessment*. Rome.
 - USDA-NRCS. (2020). *Soil Survey Manual*. Washington, D.C.
 - BPPT. (2019). *Panduan Teknis PUTS*. Jakarta.
 - Balittanah. (2015). *Petunjuk Teknis Analisis Tanah*. Bogor.
 - (dll)
-

BAB 9 – CONTOH PERHITUNGAN NYATA INA-VERITY 2.0

Ilustrasi Implementasi Framework di Lapangan

STUDI KASUS 1: LAHAN SAWAH INTENSIF JAWA BARAT

Profil Lahan

- **Lokasi:** Indramayu, Jawa Barat
- **Tipe:** Lahan sawah irigasi teknis
- **Luas:** 2 hektar
- **Komoditas:** Padi (2 kali/tahun)
- **Riwayat:** 10 tahun intensif, pupuk kimia tinggi

Data Hasil Analisis Laboratorium

Pilar 1: Fisika Tanah

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
Tekstur	Liat berdebu 35%	0.90	0.15	0.135
Bulk Density	1.25 g/cm ³	0.80	0.15	0.120
Porositas	52%	0.90	0.10	0.090

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
Air Tersedia	0.18 cm ³ /cm ³	0.87	0.10	0.087
Stabilitas Agregat	55%	0.69	0.10	0.069
Ksat	3.5 cm/jam	0.90	0.10	0.090
Kedalaman	120 cm	0.80	0.10	0.080
TOTAL SF			1.00	0.771

Pilar 2: Kimia Tanah

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
pH	5.8	0.90	0.10	0.090
C-Organik	2.2%	0.55	0.12	0.066
N-Total	0.25%	0.38	0.08	0.030
P (Bray)	18 ppm	0.65	0.08	0.052
K-dd	0.45 cmol/kg	0.25	0.06	0.015
Ca-dd	4.5 cmol/kg	0.75	0.05	0.038
Mg-dd	1.2 cmol/kg	0.60	0.05	0.030
S	8 ppm	0.53	0.04	0.021
KTK	18 cmol/kg	0.60	0.05	0.030
KB	48%	0.60	0.04	0.024

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
Al-dd	0.8 cmol/kg	0.80	0.05	0.040
C/N	12	0.90	0.03	0.027
Zn	0.8 ppm	0.40	0.03	0.012
Fe	45 ppm	0.45	0.02	0.009
Mn	15 ppm	0.38	0.02	0.008
Cu	0.4 ppm	0.40	0.01	0.004
B	0.25 ppm	0.50	0.01	0.005
Mo	0.15 ppm	0.50	0.01	0.005
TOTAL SK			1.00	0.496

Catatan: Skor kimia rendah karena defisiensi K, Zn, dan hara makro (N rendah)

Pilar 3: Biologi Tanah

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
POXC	650 mg/kg	0.65	0.20	0.130
Respirasi	150 mg CO ₂ /kg/hari	0.50	0.15	0.075
N-mineral	35 mg N/kg/minggu	0.44	0.15	0.066
Fosfatase	180 µg PNP/g/jam	0.60	0.10	0.060
Urease	85 µg NH ₄ /g/jam	0.57	0.10	0.057

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
Dehidrogenase	65 µg TPF/g/24jam	0.43	0.10	0.043
Bakteri P	8×10 ⁴ CFU/g	0.80	0.08	0.064
Bakteri N	6×10 ³ CFU/g	0.60	0.07	0.042
SHI	0.58	0.58	0.05	0.029
TOTAL SB			1.00	0.566

Pilar 4: Jenis Tanah

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
Taksonomi	Typic Hapludalfs	0.70	0.25	0.175
Bahan Induk	Aluvial	0.80	0.15	0.120
Kedalaman Solum	150 cm	1.00	0.15	0.150
Drainase	Agak terhambat	0.80	0.15	0.120
Kemiringan	2%	1.00	0.15	0.150
Batuan	<2%	1.00	0.15	0.150
TOTAL SJ			1.00	0.865

Pilar 5: Kebersihan Tanah

Parameter	Nilai	Ambang	Skor (0-1)
Cd	0.15 mg/kg	<0.3	1.00
Pb	25 mg/kg	<80	1.00
As	8 mg/kg	<25	1.00
Hg	0.08 mg/kg	<0.3	1.00
Cd tersedia	0.03 mg/kg	<0.1	1.00
Pestisida	<LOD	<BMR	1.00
Mikroplastik	120 partikel/kg	<500	1.00
C_min			1.00

Faktor Koreksi Kontaminasi = 1.00 (tidak ada kontaminasi)

Pilar 6: Agroklimat dan Manajemen

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
Curah hujan	1800 mm/th	0.90	-	-
Bulan kering	2 bulan	0.90	-	-
Suhu	27°C	0.90	-	-

Parameter	Nilai	Skor (0-1)	Bobot	Kontribusi
Kelembaban	75%	0.90	-	-
Subtotal Agroklimat		0.90	0.40	0.360
Pengolahan tanah	Konvensional	0.60	-	-
Bahan organik	3 ton/ha/th	0.60	-	-
Rotasi	Padi-padi	0.40	-	-
Pestisida	Intensif	0.30	-	-
Irigasi	Teknis	1.00	-	-
Subtotal Manajemen		0.58	0.60	0.348
TOTAL SA			1.00	0.708

Perhitungan Indeks

1. Indeks Kesehatan Tanah (IKT)

$$\begin{aligned}
 \text{IKT}_{\text{Dasar}} &= (0.25 \times \text{SF}) + (0.30 \times \text{SK}) + (0.30 \times \text{SB}) + (0.15 \times \text{SJ}) \\
 &= (0.25 \times 0.771) + (0.30 \times 0.496) + (0.30 \times 0.566) + (0.15 \times 0.865) \\
 &= 0.193 + 0.149 + 0.170 + 0.130 \\
 &= 0.642
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{IKT}_{\text{Akhir}} &= \text{IKT}_{\text{Dasar}} \times \text{Faktor}_{\text{Koreksi}_{\text{Kontaminasi}}} \\
 &= 0.642 \times 1.00 \\
 &= 0.642
 \end{aligned}$$

Kategori: BAIK (0.6 - 0.8)

Interpretasi: - Tanah dalam kondisi cukup sehat - Produktivitas optimal dengan manajemen yang tepat - Perlu perhatian pada status hara (K, Zn, N)

2. Indeks Kesesuaian Lahan untuk Padi (IKL)

Faktor Pembatas: | Parameter | Skor | Status | |—————|——|———| | K-dd | 0.25 | <0.3 (pembatas) | | Zn | 0.40 | <0.5 (pembatas) | | N-Total | 0.38 | <0.4 (pembatas) |

$$\min(\text{Faktor_Pembatas}) = 0.25$$

$$\begin{aligned} \text{IKL} &= [(\text{0.30} \times \text{SF}) + (\text{0.35} \times \text{SK}) + (\text{0.20} \times \text{SB}) + (\text{0.15} \times \text{SJ})] \times \min(\text{Faktor_Pembatas}) \\ &= [(\text{0.30} \times \text{0.771}) + (\text{0.35} \times \text{0.496}) + (\text{0.20} \times \text{0.566}) + (\text{0.15} \times \text{0.865})] \times \text{0.25} \\ &= [\text{0.231} + \text{0.174} + \text{0.113} + \text{0.130}] \times \text{0.25} \\ &= \text{0.648} \times \text{0.25} \\ &= \text{0.162} \end{aligned}$$

Kategori: N2 - Tidak Sesuai Permanen (0.0 - 0.2)

Interpretasi: - Lahan sebenarnya subur, tapi ada pembatas kritis (K rendah) - Dengan pemupukan K, lahan bisa menjadi sangat sesuai - Ini menunjukkan kelemahan pendekatan minimum - terlalu konservatif

Rekomendasi Revisi: Gunakan pendekatan rata-rata geometrik dengan penalti:

$$\begin{aligned} \text{IKL_revisi} &= (\text{rata-rata geometrik}) \times (1 - \text{0.3} \times \text{jumlah pembatas}) \\ &= \text{0.648} \times \text{0.91} \\ &= \text{0.590} \text{ (S3 - Sesuai Marginal)} \end{aligned}$$

3. Indeks Produktivitas Potensial (IPP)

Faktor_Manajemen = 0.58 (Buruk - konvensional, intensif pestisida)

$$\begin{aligned} \text{IPP} &= \text{IKT} \times (\text{0.6} + \text{0.4} \times \text{SA}) \times \text{Faktor_Manajemen} \\ &= \text{0.642} \times (\text{0.6} + \text{0.4} \times \text{0.708}) \times \text{0.58} \end{aligned}$$

$$= 0.642 \times 0.883 \times 0.58$$
$$= 0.329$$

Interpretasi: - Potensi hasil: 32.9% dari potensi genetik varietas - Jika varietas potensi 8 ton/ha, prediksi hasil = 2.6 ton/ha - Rendah karena manajemen buruk (monokultur, pestisida intensif)

4. Indeks Profitabilitas (IPR)

Asumsi Ekonomi: - Harga gabah: Rp 6.000/kg - Potensi hasil varietas: 8 ton/ha = 8.000 kg/ha - Biaya perbaikan (pupuk K, Zn, organik): Rp 3.500.000/ha - Biaya produksi total: Rp 12.000.000/ha

$$\text{Potensi_Hasil_Aktual} = 8.000 \text{ kg/ha} \times \text{IPP} = 8.000 \times 0.329 = 2.632 \text{ kg/ha}$$

$$\text{Nilai_Output} = 2.632 \text{ kg/ha} \times \text{Rp } 6.000/\text{kg} = \text{Rp } 15.792.000/\text{ha}$$

$$\text{Biaya_Perbaikan} = \text{Rp } 3.500.000/\text{ha}$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya_Total} &= \text{Biaya_Produksi} + \text{Biaya_Perbaikan} \\ &= \text{Rp } 12.000.000 + \text{Rp } 3.500.000 \\ &= \text{Rp } 15.500.000/\text{ha} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{IPR} &= (\text{Nilai_Output} - \text{Biaya_Perbaikan}) / \text{Biaya_Total} \\ &= (15.792.000 - 3.500.000) / 15.500.000 \\ &= 12.292.000 / 15.500.000 \\ &= 0.79 \end{aligned}$$

Kategori: Kurang Menguntungkan (0.5 - 1.0)

Interpretasi: - ROI = 79% (hampir impas) - Perlu perbaikan manajemen untuk meningkatkan profitabilitas - Rekomendasi: Rotasi tanaman, pengurangan pestisida, pupuk organik

STUDI KASUS 2: LAHAN MASAM LAMPUNG

Profil Lahan

- **Lokasi:** Lampung Selatan
- **Tipe:** Lahan kering, Ultisol
- **Luas:** 5 hektar
- **Komoditas:** Jagung (rencana)
- **Riwayat:** Hutan konversi 3 tahun lalu

Data Hasil Analisis (Ringkasan)

Pilar	Skor Agregat	Keterangan
SF (Fisika)	0.65	Tekstur liat, BD tinggi, drainase terhambat
SK (Kimia)	0.28	pH 4.8, Al-dd 2.5 cmol/kg, P rendah, K rendah
SB (Biologi)	0.45	POXC rendah, respirasi rendah
SJ (Jenis Tanah)	0.40	Typic Hapludults, kemiringan 15%
SA (Agroklimat)	0.75	Curah hujan 2200 mm/th

Perhitungan Indeks

$$\begin{aligned} \text{IKT}_{\text{Dasar}} &= (0.25 \times 0.65) + (0.30 \times 0.28) + (0.30 \times 0.45) + (0.15 \times 0.40) \\ &= 0.163 + 0.084 + 0.135 + 0.060 \\ &= 0.442 \end{aligned}$$

IKT_Akhir = 0.442 (tidak ada kontaminasi)

Kategori: SEDANG (0.4 - 0.6)

$$\begin{aligned} \text{IKL (untuk jagung)} &= 0.442 \times \min(0.2, 0.3, 0.4) \quad [\text{pH, Al-dd, P rendah}] \\ &= 0.442 \times 0.2 \\ &= 0.088 \end{aligned}$$

Kategori: N2 - Tidak Sesuai Permanen

Rekomendasi: - Pengapuran 2-4 ton/ha untuk menaikkan pH - Pemupukan P tinggi (fiksasi P tinggi di Ultisol) - Amelioran bahan organik - Biaya perbaikan: Rp 8-12 juta/ha

$$\begin{aligned} \text{IPR} &= (\text{Nilai_Output} - 10.000.000) / 20.000.000 \\ &= (30.000.000 - 10.000.000) / 20.000.000 \quad [\text{asumsi jagung 5 ton/ha} \times \text{Rp 6.000}] \\ &= 1.0 \end{aligned}$$

Kategori: Cukup Menguntungkan

STUDI KASUS 3: LAHAN GAMBUT KALIMANTAN

Profil Lahan

- **Lokasi:** Kubu Raya, Kalimantan Barat
- **Tipe:** Lahan gambut (Histosol)
- **Luas:** 10 hektar
- **Komoditas:** Kelapa Sawit (rencana)
- **Kedalaman gambut:** 3 meter

Data Hasil Analisis (Ringkasan)

Pilar	Skor Agregat	Keterangan
SF (Fisika)	0.45	Porositas tinggi (>80%), BD rendah (0.3 g/cm ³)
SK (Kimia)	0.35	pH 4.2, C-org 35%, N tinggi, P defisien
SB (Biologi)	0.55	Biologi aktif, tapi spesifik untuk gambut
SJ (Jenis Tanah)	0.30	Typic Haplosaprists, drainase sangat terhambat
SA (Agroklimat)	0.85	Curah hujan 2800 mm/th

Perhitungan Indeks

$$\begin{aligned} \text{IKT}_{\text{Dasar}} &= (0.25 \times 0.45) + (0.30 \times 0.35) + (0.30 \times 0.55) + (0.15 \times 0.30) \\ &= 0.113 + 0.105 + 0.165 + 0.045 \end{aligned}$$

= 0.428

IKT_Akhir = 0.428

Kategori: SEDANG (0.4 - 0.6)

Catatan Penting: - Lahan gambut memerlukan manajemen khusus - Drainase harus terkontrol (tidak boleh over-drainage) - Risiko kebakaran dan subsiden tinggi - Rekomendasi: Konservasi lebih baik daripada konversi

STUDI KASUS 4: LAHAN TERCEMAR INDUSTRI

Profil Lahan

- **Lokasi:** Dekat industri baterai
- **Tipe:** Lahan sawah
- **Luas:** 1 hektar
- **Komoditas:** Padi

Data Kontaminasi

Parameter	Nilai	Ambang	Skor
Cd	2.5 mg/kg	<0.3	0.00
Pb	350 mg/kg	<80	0.00
Cd tersedia	0.8 mg/kg	<0.1	0.00

$$C_{\min} = 0.00$$

$$\text{Faktor_Koreksi} = 0.00 \text{ (tidak layak untuk pangan)}$$

$$\text{IKT_Akhir} = \text{IKT_Dasar} \times 0.00 = 0.00$$

Kategori: SANGAT BURUK (0.0 - 0.2)

Rekomendasi: - **TIDAK BOLEH** ditanami padi (Cd masuk ke beras) - Alternatif: Fitoremediasi dengan tanaman hyperaccumulator - Atau konversi ke non-pangan (tanaman industri)

KESIMPULAN DARI STUDI KASUS

Studi Kasus	IKT	IKL	IPP	IPR	Rekomendasi
Sawah Indramayu	0.64	0.16*	0.33	0.79	Perbaiki manajemen, pupuk K dan Zn
Lahan Masam Lampung	0.44	0.09	0.15	1.00	Pengapuran, amelioran organik
Lahan Gambut	0.43	0.13	0.22	-	Konservasi lebih baik
Lahan Tercemar	0.00	0.00	0.00	-	Tidak untuk pangan

*IKL dengan pendekatan minimum terlalu konservatif. Revisi dengan rata-rata geometrik = 0.59

PELAJARAN DARI CONTOH PERHITUNGAN

1. Pentingnya Konteks

- Skor rendah tidak selalu berarti lahan buruk
- Perlu melihat faktor pembatas dan apakah dapat diperbaiki

2. Kelemahan Pendekatan Minimum

- Terlalu konservatif untuk faktor yang dapat diperbaiki

- Perlu pendekatan yang lebih nuansa

3. Integrasi Ekonomi Krusial

- Lahan subur belum tentu menguntungkan
- Biaya perbaikan harus dipertimbangkan

4. Keamanan Pangan Prioritas Utama

- Kontaminasi harus menjadi faktor pembatas absolut
- Tidak ada kompromi untuk keamanan pangan

Contoh perhitungan ini menggunakan data simulasi berdasarkan kondisi nyata di Indonesia Versi: 1.0 Tanggal: Maret 2026

Dokumen ini disusun sebagai acuan teknis bagi seluruh pemangku kepentingan INA-VERITY. Seluruh formula dan metode dapat diimplementasikan dalam perangkat lunak dan akan terus diperbaiki melalui proses validasi dan kalibrasi berkelanjutan.

Jakarta, 2026

Elwin Ardrirnato, Agri Sentinel