

ANALISIS RASTER & PENGINDRAAN JAUH

INTERMEDIATE CLASS | SERI I2 | KEHUTANAN & PERTANIAN



BADAR MUBAROK YOGASWARA

DAFTAR ISI

Pendahuluan: Dari Piksel ke Peta Keputusan	1
Prasyarat	1
Cara membaca buku ini	1
Lanjutan cerita: KPH Contoh	1
Perangkat dan data	2
Skrup pendamping	2
Hak cipta dan penggunaan	3
Unduhan: buku dan paket data	3
BAB 1: Berhitung dengan Piksel: Aljabar Raster	4
Studi kasus: "Seberapa tinggi pohonnya?"	4
Konsep: aljabar raster dalam tiga kalimat	4
Bagian A: Raster Calculator di QGIS	6
A1. NDVI dari Citra_Komposit	6
A2. Perbandingan logika: mana yang hijau?	6
A3. Tinggi tajuk: DSM dikurangi DTM	6
A4. Ekspresi bersyarat dan skrip	7
Bagian B: ArcGIS Pro	7
Bagian C: ArcMap 10.8	8
BAB 2: Membaca Bentuk Bumi: Kemiringan, Arah Lereng, dan Bayangan Bukit	10
Studi kasus: "Petak mana yang terlalu curam?"	10
Konsep: tiga turunan DEM dalam tiga kalimat	10
Bagian A: Turunan DEM di QGIS	12
Kemiringan dalam persen	12
Dengan skrip	13
Bagian B: ArcGIS Pro	13
Bagian C: ArcMap 10.8	13
BAB 3: Dari Angka ke Kelas: Reklasifikasi dan Luas per Petak	15
Studi kasus: "Berapa hektare yang curam di tiap petak?"	15
Konsep: reklasifikasi dan statistik zona dalam tiga kalimat	15
Bagian A: Reklasifikasi dan luas per KPH di QGIS	17
A1. Reklasifikasi	17
A2. Luas tiap kelas per KPH	17
A3. Dengan skrip	18
Bagian B: ArcGIS Pro	18
Bagian C: ArcMap 10.8	18
BAB 4: Biarkan Citra yang Bicara: Klasifikasi Tak Terbimbing	20
Studi kasus: "Lahan apa saja yang ada di sini?"	20
Konsep: klasifikasi tak terbimbing dalam tiga kalimat	20
Bagian A: Klasifikasi tak terbimbing di QGIS	22
Catatan jujur tentang alat	22
A1. Menyiapkan data dan melihat citranya	22
A2. Menjalankan k-means	22
A3. Membaca tabel dan memberi nama	23

Bagian B: ArcGIS Pro.....	24
Bagian C: ArcMap 10.8.....	25
BAB 5: Ajari Citra Mengenal Lahan: Klasifikasi Terbimbing.....	27
Studi kasus: "Saya mau empat kelas, dan Kebun tidak boleh hilang".....	27
Konsep: klasifikasi terbimbing dalam tiga kalimat.....	27
Bagian A: Klasifikasi terbimbing di QGIS.....	29
A1. Mengubah area latih menjadi raster.....	29
A2. Menjalankan skrip.....	29
A3. Dua aturan penentu kelas.....	29
Bagian B: ArcGIS Pro.....	31
Bagian C: ArcMap 10.8.....	31
BAB 6: Seberapa Benar Peta Ini? Uji Akurasi.....	33
Studi kasus: "Bisa dipercaya, tidak?".....	33
Konsep: uji akurasi dalam tiga kalimat.....	33
Bagian A: Uji akurasi di QGIS.....	36
A1. Mengambil kelas peta pada titik uji.....	36
A2. Akurasi keseluruhan dengan satu seleksi.....	36
A3. Matriks kesalahan.....	36
A4. Dengan skrip, dan cara kedua dengan GRASS.....	36
A5. Hasil uji keempat peta.....	37
A6. Membaca hasilnya dengan jujur.....	37
A7. Latihan terpadu: lahan terbuka di lereng curam.....	37
Bagian B: ArcGIS Pro.....	38
Bagian C: ArcMap 10.8.....	38
Lanjut belajar.....	40
Glosarium.....	41
Daftar Pustaka.....	44
Dokumentasi resmi.....	44
Aplikasi Live Penulis.....	46

Pendahuluan: Dari Piksel ke Peta Keputusan

Buku ini adalah **Seri I2** dari kelas Intermediate. Di seri sebelumnya Anda belajar membuka raster, melihat band, dan membuat indeks sederhana. Sekarang Anda mengolahnya: menghitung dengan piksel, membaca bentuk lahan dari model tinggi, lalu membuat peta tutupan lahan dan menguji seberapa benar peta itu.

Setelah selesai, Anda bisa melakukan lima hal. Pertama, menulis rumus raster sendiri. Kedua, menurunkan kemiringan, arah lereng, dan bayangan bukit dari DEM. Ketiga, mengelompokkan lereng dan menghitung luasnya per KPH. Keempat, mengklasifikasi citra dengan cara tak terbimbing dan terbimbing. Kelima, menghitung akurasi peta dengan matriks kesalahan.

Prasyarat

- **Seri B3: Raster dan Citra Dasar.** Anda sudah paham piksel, band, komposit warna, DEM, pemotongan, reklasifikasi sederhana, dan indeks vegetasi dasar.
- Seri B1 (konsep GIS, sistem koordinat) ikut dianggap dikuasai.
- Statistik zona (ringkasan angka per area) tidak perlu Anda kuasai lebih dulu. Bab 3 menjelaskannya dari awal.

Cara membaca buku ini

Satu bab terbagi dalam beberapa bagian dengan pola yang sama:

- **Studi kasus:** masalah kecil dari "KPH Contoh", sebuah kantor pengelola hutan fiktif.
- **Konsep:** inti gagasan dalam tiga kalimat, dengan analogi.
- **Langkah:** praktik di tiga perangkat. **Bagian A** untuk QGIS (acuan utama, ditulis penuh). **Bagian B** untuk ArcGIS Pro. **Bagian C** untuk ArcMap 10.8.
- **Cek paham:** tiga pertanyaan singkat beserta jawabannya.
- **Kesalahan umum:** jebakan yang sering menimpa pemula.
- **Ringkasan, latihan, dan tabel perbandingan** tiga perangkat.

Anda tidak wajib memakai ketiganya. Pilih satu perangkat, lalu ikuti bagian yang sesuai. Bila sebuah fitur tidak ada di perangkat tertentu, buku ini menyebutnya terus terang.

Lanjutan cerita: KPH Contoh

Cerita tetap berlangsung di **KPH Contoh**. Semua nama, tempat, dan peristiwa fiktif. Tokohnya dikenal lewat peran: **Analisis Muda** (itu Anda) dan **Kepala Seksi** (atasan yang sering memberi tugas mendadak). KPH Contoh terdiri atas tiga petak: **KPH Alpha** (4 ha), **KPH Beta** (4 ha), dan **KPH Gamma** (8 ha).

Di seri ini tugas Anda makin analitis. Kepala Seksi meminta kepastian: seberapa tinggi tajuk pohon, petak mana yang terlalu curam, lahan apa saja yang ada, dan seberapa bisa peta itu dipercaya.

Perangkat dan data

- **QGIS:** buku ini memakai QGIS 4.0.2. Tampilan versi lain bisa sedikit berbeda.
- **ArcGIS Pro dan ArcMap 10.8:** bagian B dan C. Nama alat diperiksa pada dokumentasi resmi. Langkah bertanda **[CEK]** perlu Anda cocokkan dengan perangkat Anda. Laporkan bila ada beda. Alat Esri untuk analisis raster umumnya butuh ekstensi **Spatial Analyst** (atau **Image Analyst** di Pro). [CEK: cek lisensi Anda]
- **Paket data:** folder `paket-data` (dari seri sebelumnya) dan `paket-i2` (baru, dibuat buatan). Semua berkoordinat WGS 84 / UTM zona 49S (EPSG:32749).

Berkas	Isi	Dipakai di
<code>paket-data/Citra_Komposit.tif</code>	citra 4 band (R, G, B, NIR), 300 x 300 piksel, 1 m	bab 1
<code>paket-data/DSM_Drone.tif</code> , <code>DTM_Drone.tif</code>	model permukaan dan model tanah, 0,5 m, 800 x 800	bab 1
<code>paket-data/Batas_KPH.gpkg</code>	tiga petak KPH	bab 3
<code>paket-i2/DEM_Lereng.tif</code>	DEM 2 m, 200 x 200, dengan bukit dan lembah	bab 2, 3
<code>paket-i2/Citra_Lahan.tif</code>	citra 4 band, 1 m, 300 x 300, empat jenis lahan	bab 4, 5, 6
<code>paket-i2/Area_Latih.gpkg</code>	24 poligon area latih (6 per kelas)	bab 4, 5
<code>paket-i2/Titik_Uji.gpkg</code>	100 titik uji (25 per kelas)	bab 6

Skrip pembuat data (`buat_data_i2.py`) ada di folder `paket-i2`. Hasil analisis dari data ini **bukan** kondisi lapangan sebenarnya.

Skrip pendamping

Setiap bab punya skrip Python di folder `skrip` (`i2_01_aljabar_raster.py` sampai `i2_07_terpadu.py`). Buka di QGIS lewat **Plugins ► Python Console**, klik ikon **Show Editor**, buka berkasnya, ubah jalur folder di bagian atas, lalu klik **Run**. Angka yang tertulis di buku adalah angka keluaran skrip itu pada QGIS 4.0.2.

Catatan tentang ilustrasi: Gambar di buku ini adalah **skema buatan penulis**, bukan tangkapan layar. Letak tombol di komputer Anda bisa sedikit berbeda. Ikuti nama menu yang tertulis.

Tentang klasifikasi di QGIS: QGIS bawaan tidak punya menu klasifikasi citra yang siap pakai di Processing. Alat GRASS yang menyertainya diuji pada penulisan buku ini: `i.cluster` berjalan, tetapi `i.maxlik` gagal membaca berkas tanda spektral hasilnya (lihat bab 4). Karena itu bab 4 dan 5 menulis algoritmanya dalam Python dengan NumPy. Ini sekaligus membuat Anda paham isi di balik tombolnya. Plugin pihak ketiga (misalnya Semi-Automatic Classification Plugin) tidak dibahas di buku ini. [CEK]

Kontak penulis: badarmubarok@gmail.com.

Hak cipta dan penggunaan

Hak cipta © 2026 Badar Mubarak Yogaswara. All Rights Reserved.

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penulis. Untuk penggunaan lain, misalnya bahan ajar berbayar atau penerbitan ulang, hubungi penulis di badarmubarak@gmail.com.

Data latihan di buku ini buatan (sintetis), bukan data lapangan. Nama produk dan merek, misalnya QGIS dan ArcGIS, milik pemiliknya masing-masing.

Unduhan: buku dan paket data

Buku ini dan semua berkas latihannya tersedia gratis di situs penulis. Alamat lengkapnya tertulis di bawah, jadi bisa Anda ketik langsung bila membaca versi cetak.

Berkas	Tautan	Isi
Halaman unduhan I2	https://badarmubarak.id/buku-gis/i2/unduhan.html	semua berkas seri ini
Buku (PDF)	https://badarmubarak.id/buku-gis/i2/unduhan/BUKU-I2.pdf	buku ini dalam PDF
Paket data latihan	https://badarmubarak.id/buku-gis/i2/unduhan/data-sintetis-i2.zip	data sintetis latihan
Skrip (zip)	https://badarmubarak.id/buku-gis/i2/unduhan/skrip-i2.zip	skrip Python dan lainnya
Seluruh seri	https://badarmubarak.id/buku-gis/	12 buku Basic sampai Master

Pindai kode QR ini dengan kamera ponsel untuk membuka halaman unduhan I2.



BAB 1: Berhitung dengan Piksel: Aljabar Raster

Studi kasus: "Seberapa tinggi pohonnya?"

Kepala Seksi membawa dua berkas hasil terbang drone: model permukaan (DSM) dan model tanah (DTM). Ia bertanya, "Berapa luas tajuk yang tingginya di atas lima meter?" Anda juga diminta menandai bagian citra yang hijau dan sehat. Dua pertanyaan itu terjawab dengan satu keterampilan: menghitung antar-raster.

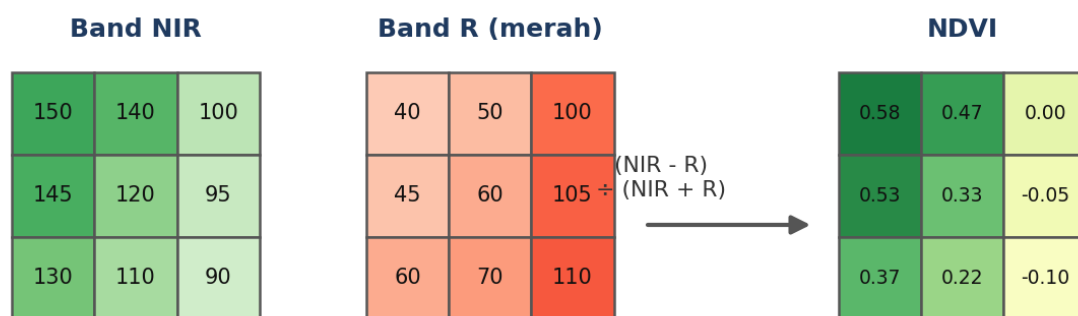
Konsep: aljabar raster dalam tiga kalimat

Aljabar raster adalah berhitung pada raster: rumus dijalankan di setiap piksel, pada letak yang sama, lalu hasilnya menjadi raster baru. Bayangkan dua lembar kertas berpetak yang ditumpuk. Anda mengurangkan angka di petak yang berimpit, dan jawabannya ditulis di lembar ketiga. Alat untuk melakukannya disebut **Raster Calculator**.

Istilah baru bab ini:

- **Aljabar raster**: rumus yang dijalankan per piksel.
- **Ekspresi**: rumus yang Anda tulis, misalnya "A@1" - "B@1".
- **NoData**: piksel tanpa nilai. Hasil hitungannya juga NoData.
- **CHM** (*Canopy Height Model*): tinggi tajuk = DSM dikurangi DTM.
- **Perbandingan logika**: ekspresi seperti "x@1" > 5 yang menghasilkan 1 (benar) atau 0 (salah).

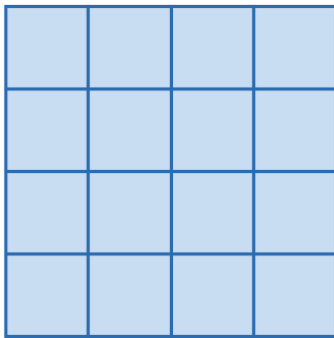
Ilustrasi 1.1: Rumus per piksel



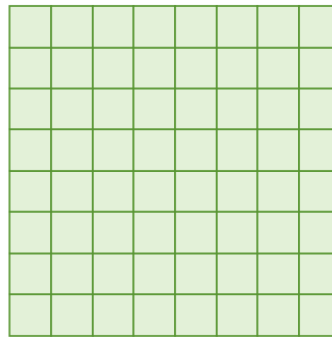
Hitungan dilakukan di tiap piksel, satu per satu, pada letak yang sama.

Skema; bukan tangkapan layar

Tiga aturan penting. **Pertama**, nama layer di ekspresi ditulis "nama_layer@nomor_band". **Kedua**, bila salah satu piksel masukan NoData, hasilnya NoData. Hal ini diuji pada penulisan buku ini. **Ketiga**, raster yang dihitung bersama sebaiknya satu sistem koordinat dan satu luas. Kalau ukuran pikselnya beda, hasil mengikuti ukuran yang Anda pilih.

Ilustrasi 1.2: Pikel beda ukuran**Raster A: piksel 2 m**

4 x 4 piksel

Raster B: piksel 1 m (sama luas)

8 x 8 piksel

Hasil mengikuti
ukuran piksel
yang Anda pilih
(sisanya diambil
terdekat)

Skema; bukan tangkapan layar

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Raster Calculator di QGIS

A1. NDVI dari Citra_Komposit

NDVI mengukur kehijauan. Rumusnya $(NIR - R) \div (NIR + R)$. Di `Citra_Komposit.tif`, band 1 = merah (R) dan band 4 = inframerah dekat (NIR).

1. Tambahkan `Citra_Komposit.tif` dari paket-data (**Layer ► Add Layer ► Add Raster Layer**).
2. Buka **Raster ► Raster Calculator**. Pada kotak ekspresi, ketik rumus berikut.

EKSPRESI

```
("Citra_Komposit@4" - "Citra_Komposit@1") / ("Citra_Komposit@4" + "Citra_Komposit@1")
```

3. Pada **Output layer**, pilih lokasi dan nama `ndvi.tif`. Pada **Output format**, pilih GeoTIFF.
4. Pada **Selected Layer Extent**, pilih layer `Citra_Komposit@1` agar luas dan ukuran piksel mengikuti citra. Klik **OK**.
5. Layer `ndvi` muncul. Klik kanan ► **Properties ► Information** untuk melihat statistiknya.

Hasilnya, pada skrip uji: nilai NDVI terendah **-0,26**, tertinggi **0,90**, rata-rata **0,34**. Citra ini berisi tiga lajur tutupan. Rata-rata NDVI per lajur adalah 0,50; 0,56; dan -0,05. Lajur ketiga hampir tanpa vegetasi.

Band 4 ditandai "Alpha": GDAL menandai band keempat berkas ini sebagai *Alpha* (transparansi). Perhitungan memakainya sebagai angka biasa, jadi rumus di atas benar. Namun saat menampilkan komposit warna, pakai hanya band 1 sampai 3 agar citra tidak ikut transparan. [CEK di antarmuka]

A2. Perbandingan logika: mana yang hijau?

6. Buka lagi Raster Calculator. Pilih layer `ndvi@1`, lalu ketik:

EKSPRESI

```
"ndvi@1" > 0.3
```

7. Simpan sebagai `vegetasi.tif`. Piksel dengan NDVI di atas 0,3 bernilai 1, sisanya 0.

Rata-rata raster 0/1 sama dengan **bagian piksel bernilai 1**. Hasil uji: rata-rata `vegetasi.tif` = **0,6666**, artinya sekitar dua pertiga citra bervegetasi (dua dari tiga lajur). Ambang 0,3 hanyalah contoh. Tentukan ambang dari data dan tujuan Anda.

A3. Tinggi tajuk: DSM dikurangi DTM

8. Tambahkan `DSM_Drone.tif` dan `DTM_Drone.tif` dari paket-data.
9. Buka Raster Calculator. Ekspresi:

EKSPRESI

```
"DSM_Drone@1" - "DTM_Drone@1"
```

10. Simpan sebagai `chm.tif`. Pilih extent dan ukuran piksel mengikuti `DSM_Drone@1` (0,5 m).

11. Buat satu lagi untuk tajuk tinggi, memakai layer `chm@1`:

EKSPRESI

```
"chm@1" >= 5
```

Hasil uji: CHM berkisar **0 sampai 13,96 m**, rata-rata **2,60 m**. Bagian piksel bertajuk 5 m atau lebih adalah **18,87%**. Satu piksel $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 0,25 \text{ m}^2$, dan seluruh area 640.000 piksel (16 ha). Jadi luas tajuk tinggi = **3,02 ha**.

Jawaban untuk Kepala Seksi: sekitar 3 hektare dari 16 hektare area contoh bertajuk 5 meter atau lebih.

A4. Ekspresi bersyarat dan skrip

Fungsi `if(kondisi, nilai_bila_benar, nilai_bila_salah)` tersedia di Raster Calculator. Contoh: beri nilai 2 pada piksel tajuk tinggi dan 1 pada sisanya.

EKSPRESI

```
if("chm@1" >= 5, 2, 1)
```

Semua langkah A1 sampai A3 sudah ditulis dalam skrip `i2_01_aljabar_raster.py`. Skrip memakai alat Processing `native:rastercalc`. Dengan skrip, Anda cukup mengganti jalur untuk mengulang analisis di data lain.

PYTHON

```
processing.run("native:rastercalc", {
    "EXPRESSION": '"DSM_Drone@1" - "DTM_Drone@1"', "LAYERS": [dsm, dtm],
    "CELL_SIZE": dsm.rasterUnitsPerPixelX(), "EXTENT": dsm.extent(), "CRS": dsm.crs(),
    "OUTPUT": "C:/temp/hasil_i2/chm.tif"})
```

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

Alat padanannya adalah **Raster Calculator** (Spatial Analyst), di panel **Geoprocessing**. Alat ini memakai Map Algebra. [CEK]

1. Tambahkan `Citra_Komposit.tif` ke peta. Band muncul sebagai layer terpisah di panel Contents. [CEK]
2. Cari **Raster Calculator** di panel Geoprocessing. Klik dua kali. [CEK]
3. Tulis ekspresi NDVI dengan fungsi `Float()` agar pembagian tidak dibulatkan menjadi bilangan bulat. Nama band mengikuti yang tampil di daftar. [CEK]

4. Atur raster keluaran, lalu jalankan.
5. Untuk CHM, kurangkan DSM dengan DTM dengan cara yang sama. Ekspresi logika seperti `chm >= 5` menghasilkan 1 dan 0. [CEK]

Pro tidak memakai tanda @ untuk nomor band. Cara menulis band bergantung nama layer di Contents. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

Padanannya adalah **Raster Calculator** di **Spatial Analyst Tools ► Map Algebra**. Alat ini perlu ekstensi Spatial Analyst. [CEK]

1. Aktifkan ekstensi lewat **Customize ► Extensions ► Spatial Analyst**. [CEK]
2. Buka **ArcToolbox ► Spatial Analyst Tools ► Map Algebra ► Raster Calculator**. [CEK]
3. Klik dua kali nama band di daftar layer agar tertulis di ekspresi. Bungkus pembagian dengan `Float()`. [CEK]
4. Tentukan raster keluaran, lalu klik **OK**.
5. Perbandingan seperti `"chm" >= 5` menghasilkan 1 dan 0. [CEK]

Cek paham

1. Apa yang terjadi bila satu piksel masukan bernilai NoData?
2. Mengapa rata-rata raster hasil `"x@1" > 0.3` bisa dibaca sebagai bagian luas?
3. Bagaimana CHM dihitung?

Jawaban:

1. Piksel hasil di letak itu juga NoData.
2. Raster itu hanya berisi 0 dan 1. Rata-rata sama dengan jumlah piksel bernilai 1 dibagi jumlah piksel, jadi menunjukkan bagian yang memenuhi syarat.
3. $CHM = DSM - DTM$, piksel demi piksel.

Kesalahan umum

- **Menulis nama layer tanpa '@nomor_band'**. Ekspresi gagal. Pilih nama dari daftar layer di dialog, jangan diketik dari ingatan.
- **Membagi bilangan bulat di perangkat yang membulatkan**. Di Esri, bungkus dengan `Float()`. Di QGIS Raster Calculator, hasil pembagian pada data ini sudah berupa desimal (terlihat pada NDVI di atas).
- **Menghitung dua raster yang beda sistem koordinat atau beda luas**. Samakan dahulu, lalu hitung.
- **Lupa mengatur luas dan ukuran piksel keluaran**. Hasil bisa terpotong. Pilih layer acuan di **Selected Layer Extent**.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: aljabar raster menjalankan rumus per piksel. NDVI, CHM, dan ambang 0/1 adalah tiga contoh. NoData menular ke hasil.

Latihan:

1. Buat raster untuk piksel dengan CHM antara 2 dan 5 m. Petunjuk: gabungkan dua perbandingan dengan `AND`.
2. Hitung bagian area bernilai NDVI di atas 0,5 pada `Citra_Komposit`. Bandingkan dengan hasil ambang 0,3 dan jelaskan bedanya.

Tabel perbandingan: aljabar raster

Hal	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8
Alat	Raster Calculator (Raster ► Raster Calculator, atau Processing)	Raster Calculator (Spatial Analyst) [CEK]	Raster Calculator (Map Algebra) [CEK]
Menulis band	"layer@2"	nama band dari daftar [CEK]	klik dua kali nama band [CEK]
Syarat	tanpa ekstensi	ekstensi Spatial Analyst [CEK]	ekstensi Spatial Analyst [CEK]
Bersyarat	<code>if(k, a, b)</code>	Con [CEK]	Con [CEK]

BAB 2: Membaca Bentuk Bumi: Kemiringan, Arah Lereng, dan Bayangan Bukit

Studi kasus: "Petak mana yang terlalu curam?"

Rencana penanaman baru harus menghindari lereng yang terlalu miring. Kepala Seksi memberi Anda satu berkas tinggi permukaan tanah, `DEM_Lereng.tif`, dan bertanya, "Mana bagian yang curam, ke mana lerengnya menghadap, dan bisa dibuatkan peta yang mudah dilihat?" Semua jawabannya bisa diturunkan dari satu DEM.

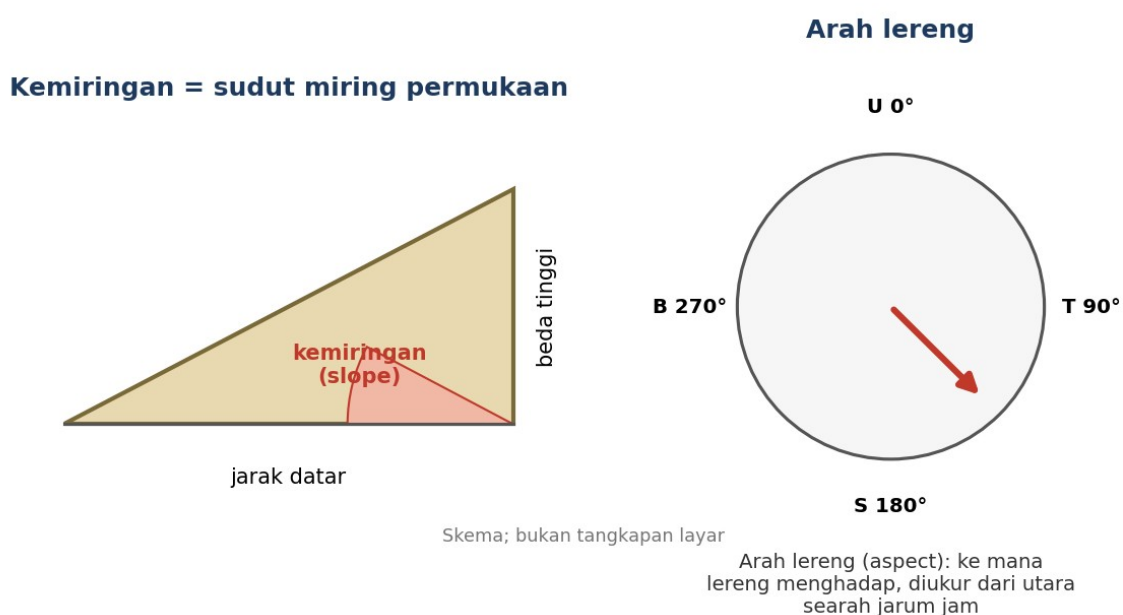
Konsep: tiga turunan DEM dalam tiga kalimat

DEM adalah raster yang tiap pikselnya menyimpan tinggi tanah. Dari selisih tinggi piksel yang bertetangga, GIS menghitung **kemiringan** (seberapa miring), **arah lereng** (menghadap ke mana), dan **bayangan bukit** (tampilan seolah disinari matahari). Seperti bola di atas meja miring: kemiringan menunjukkan seberapa cepat bola menggelinding, arah lereng menunjukkan ke mana ia menggelinding.

Istilah baru bab ini:

- **DEM** (*Digital Elevation Model*): raster tinggi tanah.
- **Slope** (kemiringan): sudut miring permukaan, dalam derajat atau persen.
- **Aspect** (arah lereng): arah hadap lereng, diukur dari utara searah jarum jam (0° = utara, 90° = timur, 180° = selatan, 270° = barat).
- **Hillshade** (bayangan bukit): gambar bayangan dari sinar matahari buatan.
- **Faktor Z**: pengali tinggi bila satuan tinggi dan satuan peta berbeda.

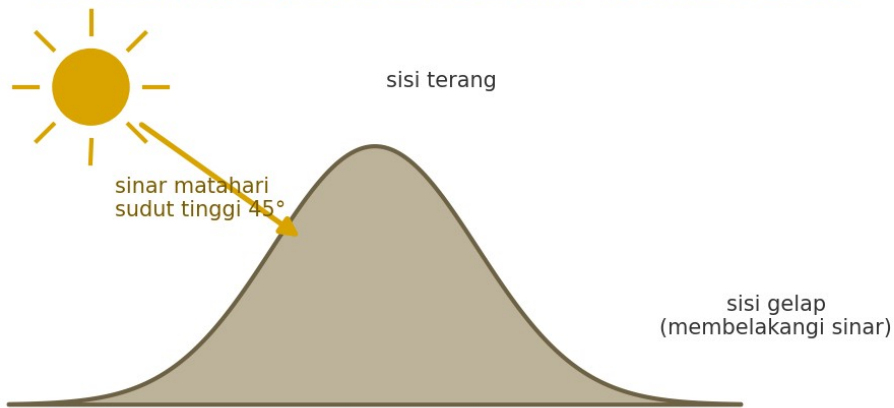
Ilustrasi 2.1: Kemiringan dan arah lereng



Dua hal yang sering membingungkan. **Pertama**, kemiringan **derajat** dan **persen** berbeda. Persen = $\tan(\text{derajat}) \times 100$. Lereng 45° sama dengan 100%. **Kedua**, faktor Z. DEM ini berkoordinat meter dan tingginya juga meter, jadi faktor $Z = 1$. Bila DEM berkoordinat derajat, hasilnya salah kecuali Anda memproyeksikannya ke UTM lebih dulu (bab B1).

Ilustrasi 2.2: Hillshade

Hillshade: peta bayangan dari arah sinar tertentu (arah 315° = barat laut)



Skema; bukan tangkapan layar

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Turunan DEM di QGIS

1. Tambahkan `DEM_Lereng.tif` dari `paket-i2`. Lihat **Properties ► Information**: DEM berukuran 200 x 200 piksel, piksel 2 m, tinggi **89,6 sampai 150,7 m**, rata-rata **114,7 m**. Ada dua bukit, satu lembah, dan dataran.
2. Buka **Processing Toolbox** (Ctrl+Alt+T). Buka kelompok **Raster terrain analysis**, lalu klik dua kali **Slope**.
3. Pada **Elevation layer**, pilih `DEM_Lereng`. Biarkan **Z factor** = 1. Simpan keluaran sebagai `slope_derajat.tif`, lalu klik **Run**.
4. Ulangi untuk **Aspect**, simpan sebagai `aspect.tif`.
5. Ulangi untuk **Hillshade**. Isi **Azimuth** 315 dan **Vertical angle** 45. Simpan sebagai `hillshade.tif`.
6. Susun layer: `hillshade` di bawah, `DEM_Lereng` (atau `slope`) di atasnya. Buka **Properties ► Transparency** dan atur opasitas sekitar 50% pada layer atas. Peta berpadu dengan bayangan bukit.

Hasil uji pada skrip `i2_02_turunan_dem.py`:

Hasil	Terendah	Tertinggi	Rata-rata
Slope (derajat)	0,13	37,34	12,57
Aspect (derajat dari utara)	0,01	359,99	200,88
Hillshade (0 sampai 255)	44,98	248,16	174,62

Rata-rata aspect tidak bermakna sebagai "arah rata-rata", sebab 359° dan 1° sebenarnya berdekatan. Gunakan aspect untuk melihat sebaran, bukan untuk dirata-ratakan.

Arah lereng benar-benar diuji: Pada bukit landai di sisi timur puncak, aspect bernilai sekitar **95°**. Di sisi barat sekitar **267°**, di sisi selatan sekitar **182°**, dan di sisi utara sekitar **357°**. Jadi 90° memang timur, 180° selatan, dan seterusnya.

Kemiringan dalam persen

7. Buka **Raster ► Raster Calculator**. Ekspresi di bawah mengubah derajat menjadi persen.

EKSPRESI

```
tan("slope_derajat@1" * 3.14159265358979 / 180) * 100
```

8. Simpan sebagai `slope_persen.tif`. Tinggi slope 37,34° setara **76,3%**, dan itu persis nilai tertinggi di `slope_persen`.

Perhitungan slope QGIS dicocokkan dengan hitungan mandiri memakai metode tetangga 3 x 3 (Horn). Pada piksel bagian dalam, selisih terbesar adalah 0,0000°. Di tepi raster, piksel tidak punya tetangga lengkap, jadi nilainya bisa berbeda tipis antarperangkat.

Dengan skrip

Skrip `i2_02_turunan_dem.py` menjalankan tiga alat Processing: `native:slope`, `native:aspect`, `native:hillshade`.

PYTHON

```
kemiringan = processing.run("native:slope", {"INPUT": dem, "Z_FACTOR": 1.0, "OUTPUT":
"C:/temp/hasil_i2/slope_derajat.tif"})["OUTPUT"]
bayangan = processing.run("native:hillshade", {"INPUT": dem, "Z_FACTOR": 1.0, "AZIMUTH": 315.0, "V_ANGLE":
45.0,
"OUTPUT": "C:/temp/hasil_i2/hillshade.tif"})["OUTPUT"]
```

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

Alat **Slope**, **Aspect**, dan **Hillshade** ada di kelompok **Surface** pada Spatial Analyst. [CEK]

1. Tambahkan `DEM_Lereng.tif` ke peta. [CEK]
2. Buka alat **Slope**. Pilih DEM sebagai raster masukan. Pada satuan keluaran, pilih **Degree** atau **Percent rise**. [CEK]
3. Buka alat **Aspect**, lalu jalankan dengan DEM yang sama. [CEK]
4. Buka alat **Hillshade**. Isi azimuth 315 dan altitude 45, lalu jalankan. [CEK]
5. Hasil kemiringan persen dari Pro sudah tersedia lewat satuan **Percent rise**, jadi rumus $\tan$ tidak diperlukan. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

Ketiga alat ada di **ArcToolbox ► Spatial Analyst Tools ► Surface**. [CEK]

1. Aktifkan ekstensi **Spatial Analyst**. [CEK]
2. Jalankan **Slope** dengan DEM masukan. Pilih satuan **DEGREE** atau **PERCENT_RISE**. [CEK]
3. Jalankan **Aspect**, lalu **Hillshade** (azimuth 315, altitude 45). [CEK]

Cek paham

1. Berapa persen kemiringan 45° ?
2. Aspect bernilai 270° berarti lereng menghadap ke mana?
3. Mengapa DEM berkoordinat derajat tidak cocok langsung untuk slope?

Jawaban:

1. 100%, karena $\tan 45^\circ = 1$.
2. Barat.

3. Jarak mendatar diukur dalam derajat, sedangkan tinggi dalam meter. Satuan tidak sama, jadi kemiringan salah. Proyeksikan DEM ke UTM dulu.

Kesalahan umum

- **Mencampur derajat dan persen.** Selalu tulis satuannya di nama berkas, misalnya `slope_persen.tif`.
- **Merata-ratakan aspect.** Nilai 359° dan 1° bersebelahan, tetapi rata-ratanya 180°. Gunakan aspect untuk peta dan kelas arah, bukan rata-rata.
- **Memakai DEM dengan lubang atau puncak palsu.** Kesalahan kecil pada DEM terbaca sebagai lereng curam. Periksa DEM dengan hillshade.
- **Menganggap hillshade sebagai data.** Hillshade hanya tampilan. Jangan dipakai sebagai angka analisis.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: dari satu DEM Anda mendapat slope, aspect, dan hillshade. Slope bisa dalam derajat atau persen. Aspect dari utara searah jarum jam. Hillshade untuk tampilan.

Latihan:

1. Ubah azimuth hillshade menjadi 135 lalu bandingkan dengan 315. Mana yang lebih mudah dibaca bagi Anda?
2. Cari nilai slope di sisi bukit curam dengan alat **Identify Features**. Puncaknya sekitar 90 m ke timur dan 300 m ke utara dari sudut barat daya area; sisinya sekitar 45 m dari puncak. Mengapa nilai di puncak sendiri hampir nol?

Tabel perbandingan: turunan DEM

Hal	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8
Slope	Processing ► Raster terrain analysis ► Slope (derajat)	Slope (Spatial Analyst), derajat atau persen [CEK]	Slope, DEGREE atau PERCENT_RISE [CEK]
Aspect	Aspect	Aspect [CEK]	Aspect [CEK]
Hillshade	Hillshade (azimuth, vertical angle)	Hillshade (azimuth, altitude) [CEK]	Hillshade [CEK]
Persen	hitung dari derajat dengan Raster Calculator	pilihan satuan [CEK]	pilihan satuan [CEK]
Syarat	tanpa ekstensi	Spatial Analyst [CEK]	Spatial Analyst [CEK]

BAB 3: Dari Angka ke Kelas: Reklasifikasi dan Luas per Petak

Studi kasus: "Berapa hektare yang curam di tiap petak?"

Peta kemiringan Anda penuh angka kontinu, dari 0 sampai 76 persen. Kepala Seksi tidak mau angka sebanyak itu. Ia ingin lima kelas lereng, lalu tabel luas tiap kelas di KPH Alpha, Beta, dan Gamma. Dengan begitu ia bisa memutuskan petak mana yang paling berisiko.

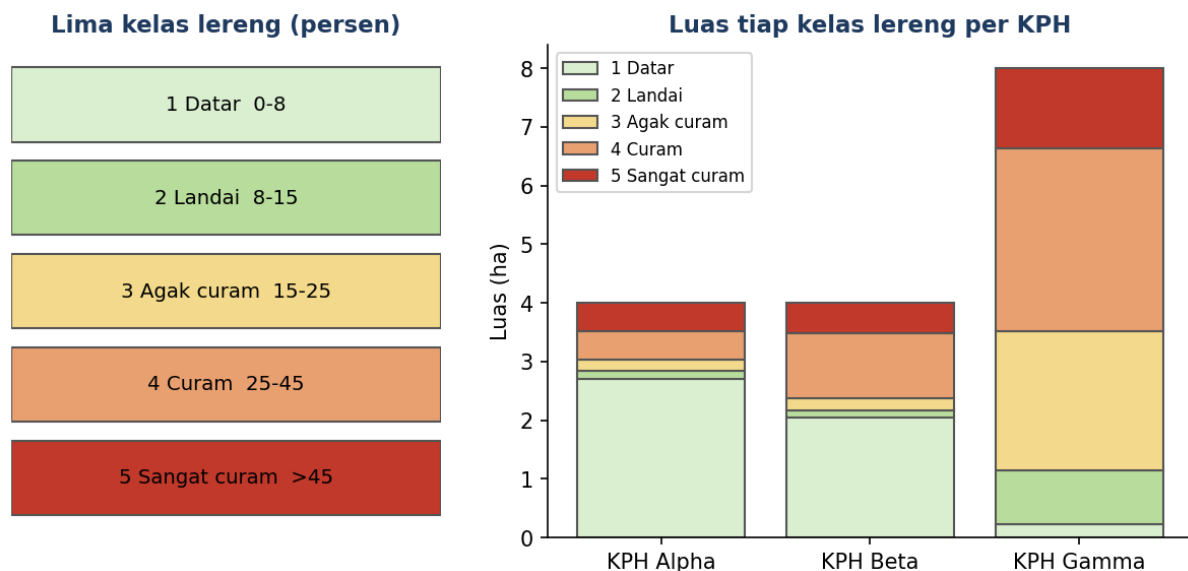
Konsep: reklasifikasi dan statistik zona dalam tiga kalimat

Reklasifikasi mengganti rentang angka menjadi kelas, seperti mengubah nilai ujian 0 sampai 100 menjadi huruf A sampai E. **Statistik zona** menghitung isi raster di dalam tiap poligon, misalnya berapa piksel tiap kelas di tiap petak. Piksel dikali luasnya memberi hektare.

Istilah baru bab ini:

- **Reklasifikasi**: mengubah rentang nilai menjadi kelas.
- **Tabel reklasifikasi**: daftar rentang awal, rentang akhir, dan kelas baru.
- **Zona**: poligon tempat raster dirangkum (di sini petak KPH).
- **Histogram zonal**: jumlah piksel per kelas di dalam tiap zona.
- **Aturan batas**: apakah nilai tepat di batas masuk kelas bawah atau atas.

Ilustrasi 3.1: Kelas lereng dan luasnya



Skema; bukan tangkapan layar (angka dari data sintetis)

Contoh lima kelas lereng yang dipakai di bab ini, dalam persen: 1 Datar (0 sampai 8), 2 Landai (8 sampai 15), 3 Agak curam (15 sampai 25), 4 Curam (25 sampai 45), dan 5 Sangat curam (di atas 45). Rentang ini umum dipakai, tetapi **cocokkan dengan aturan instansi Anda**. [CEK]

Aturan batas: Di buku ini nilai tepat di batas masuk kelas **bawah**: kelas 1 berlaku untuk nilai 0 sampai 8 (termasuk 0 dan 8), kelas 2 untuk lebih dari 8 sampai 15, dan seterusnya. QGIS menyebutnya `min < value <= max`. Karena itu batas awal kelas 1 ditulis -1, bukan 0. Dengan 0, piksel yang kemiringannya tepat 0 persen tidak masuk kelas mana pun. Hasil ini sama dengan hitungan mandiri pada semua piksel bagian dalam raster.

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Reklasifikasi dan luas per KPH di QGIS

Bab ini memakai `slope_persen.tif` dari bab 2 dan `Batas_KPH.gpkg` dari paket-data.

A1. Reklasifikasi

1. Tambahkan `slope_persen.tif` dan `Batas_KPH.gpkg` ke proyek.
2. Di **Processing Toolbox**, buka **Raster analysis ► Reclassify by table**.
3. Pilih `slope_persen` sebagai **Raster layer**. Klik tombol ... pada **Reclassification table**, lalu isi lima baris berikut.

Minimum	Maximum	Value
-1	8	1
8	15	2
15	25	3
25	45	4
45	1000	5

4. Pada **Range boundaries**, pilih `min < value <= max`.
5. Simpan keluaran sebagai `kelas_lereng.tif`, lalu klik **Run**.
6. Beri warna berbeda tiap kelas lewat **Properties ► Symbology ► Paletted/Unique values**.

Hasilnya: raster berisi angka 1 sampai 5. (Pada uji skrip, tipe datanya Float32.)

A2. Luas tiap kelas per KPH

7. Buka **Raster analysis ► Zonal histogram**.
8. Pilih `kelas_lereng` sebagai raster dan `Batas_KPH` sebagai lapisan zona. Pada **Output column prefix**, ketik `K`.
9. Simpan keluaran, lalu buka tabel atributnya. Tiap petak punya kolom `K1` sampai `K5`, isinya jumlah piksel.
10. Satu piksel DEM = 2 m x 2 m = 4 m² = 0,0004 ha. Kalikan jumlah piksel dengan 0,0004. Anda bisa memakai **Field Calculator**, misalnya `"K4" * 0.0004`.

Hasil uji (luas dalam hektare, dari skrip `i2_03_kelas_lereng.py`):

Petak	Datar	Landai	Agak curam	Curam	Sangat curam	Jumlah
KPH Alpha	2,71	0,14	0,18	0,48	0,49	4,00
KPH Beta	2,05	0,12	0,20	1,12	0,51	4,00
KPH Gamma	0,23	0,91	2,37	3,12	1,37	8,00

Jumlah tiap baris cocok dengan luas petak (4, 4, dan 8 ha). Itu tanda perhitungan Anda benar.

Jawaban untuk Kepala Seksi: bagian **curam dan sangat curam** (di atas 25 persen) kira-kira 24% di KPH Alpha (0,97 ha), 41% di KPH Beta (1,63 ha), dan 56% di KPH Gamma (4,49 ha). Petak Gamma paling berisiko, karena bukit curam ada di sana.

A3. Dengan skrip

PYTHON

```
tabel = [-1, 8, 1, 8, 15, 2, 15, 25, 3, 25, 45, 4, 45, 1000, 5]
kelas = processing.run("native:reclassifybytable", {
    "INPUT_RASTER": persen, "RASTER_BAND": 1, "TABLE": tabel, "NO_DATA": -9999,
    "RANGE_BOUNDARIES": 0, "NODATA_FOR_MISSING": False, "DATA_TYPE": 5,
    "OUTPUT": "C:/temp/hasil_i2/kelas_lereng.tif"})["OUTPUT"]
hist = processing.run("native:zonalhistogram", {"INPUT_RASTER": lyr_kelas, "RASTER_BAND": 1,
    "INPUT_VECTOR": batas, "COLUMN_PREFIX": "K", "OUTPUT": "C:/temp/hasil_i2/luas_kelas_per_kph.gpkg"})
["OUTPUT"]
```

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

1. Jalankan alat **Reclassify** (Spatial Analyst) pada raster kemiringan. Isi tabel rentang dan kelas baru seperti di atas. [CEK]
2. Aturan batas Esri bisa berbeda dari QGIS. Periksa dokumentasi alat dan uji dengan satu nilai tepat di batas (misalnya tepat 8). [CEK]
3. Untuk luas per petak, pakai **Tabulate Area** (Spatial Analyst): zona = Batas_KPH, kelas = raster hasil reklasifikasi. Hasilnya tabel luas dalam satuan peta (m²). [CEK]
4. Alternatif: **Zonal Statistics as Table** untuk statistik angka (rata-rata, maksimum). [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

1. Jalankan **Reclassify** di **Spatial Analyst Tools ► Reclass**. Isi tabel rentang. [CEK]
2. Untuk luas per petak, pakai **Tabulate Area** di **Spatial Analyst Tools ► Zonal**. [CEK]
3. **Zonal Statistics as Table** tersedia di kelompok yang sama untuk statistik angka. [CEK]

Cek paham

1. Mengapa jumlah luas lima kelas harus sama dengan luas petak?
2. Satu piksel 2 m x 2 m berapa hektare?
3. Apa gunanya aturan batas?

Jawaban:

1. Setiap piksel masuk tepat satu kelas. Bila jumlahnya tidak sama, ada piksel hilang (misalnya NoData) atau zona tidak pas.
2. 4 m² = 0,0004 ha.

- Menentukan ke kelas mana nilai yang tepat di batas masuk, supaya tidak ada piksel ganda atau terlewat.

Kesalahan umum

- Rentang tumpang tindih atau berlubang.** Piksel bisa tak terklasifikasi. Pastikan akhir satu baris = awal baris berikutnya.
- Rentang persen tetapi rastanya derajat.** Hasilnya kacau. Cek satuan sebelum reklasifikasi.
- Lupa mengalikan piksel dengan luasnya.** Tabel zonal berisi jumlah piksel, bukan hektare.
- Zona dan raster beda sistem koordinat.** Statistik zona kosong atau salah. Samakan dulu.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: reklasifikasi mengubah angka menjadi kelas. Histogram zonal menghitung piksel tiap kelas di tiap petak. $\text{Piksel} \times \text{luas piksel} = \text{luas}$. Jumlah kelas per petak harus sama dengan luas petak.

Latihan:

- Ubah batas kelas menjadi 0 sampai 10, 10 sampai 20, 20 sampai 40, dan di atas 40. Bagaimana luas Gamma berubah?
- Pakai kemiringan dalam derajat (`slope_derajat.tif`) dan buat kelas sendiri. Bandingkan dengan hasil persen.

Tabel perbandingan: reklasifikasi dan luas per zona

Hal	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8
Reklasifikasi	Reclassify by table	Reclassify [CEK]	Reclassify [CEK]
Luas per zona	Zonal histogram (jumlah piksel)	Tabulate Area (luas) [CEK]	Tabulate Area (luas) [CEK]
Statistik angka per zona	Zonal statistics	Zonal Statistics as Table [CEK]	Zonal Statistics as Table [CEK]
Syarat	tanpa ekstensi	Spatial Analyst [CEK]	Spatial Analyst [CEK]

BAB 4: Biarkan Citra yang Bicara: Klasifikasi Tak Terbimbing

Studi kasus: "Lahan apa saja yang ada di sini?"

Anda menerima citra baru `Citra_Lahan.tif` dari area contoh. Kepala Seksi ingin peta tutupan lahan, tetapi belum ada daftar kelas yang pasti. "Coba lihat saja, citranya mengelompok jadi apa," katanya. Itu pekerjaan klasifikasi tak terbimbing: komputer mengelompokkan piksel yang mirip, lalu Anda yang memberi nama kelompoknya.

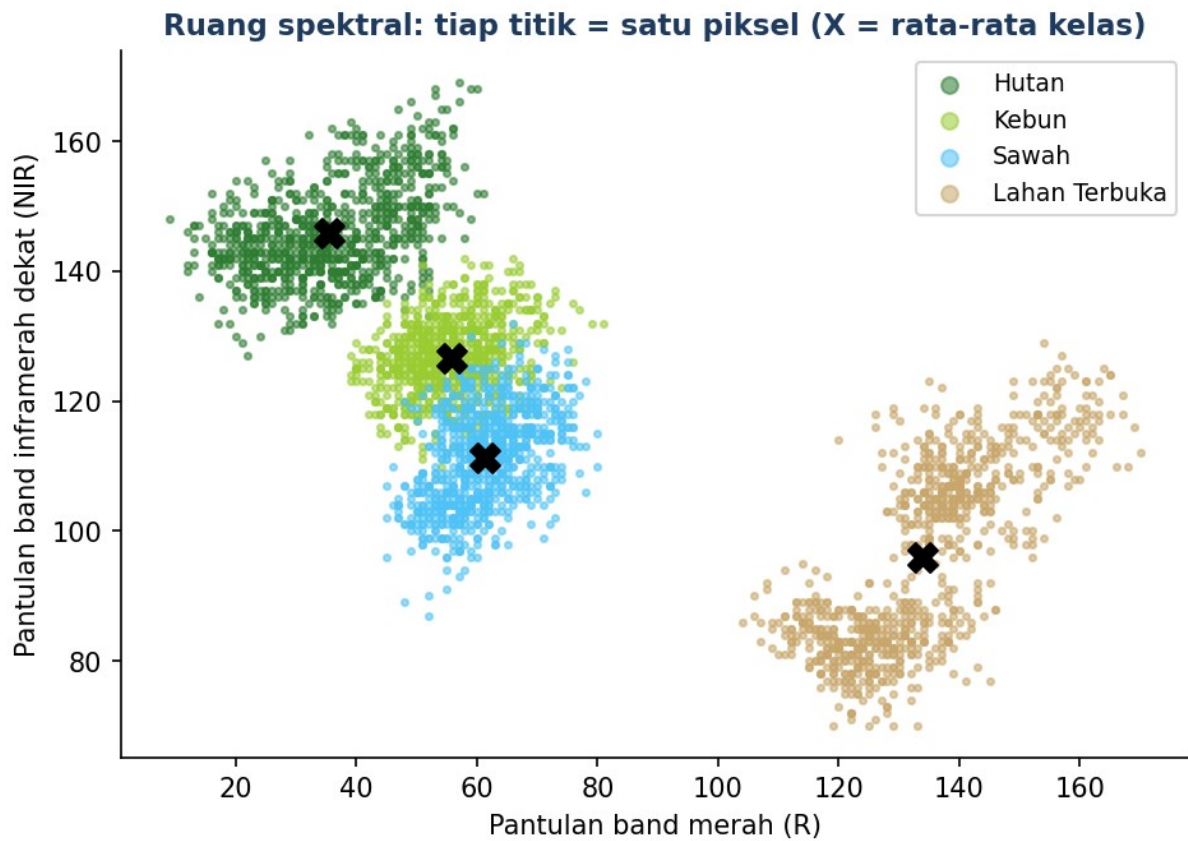
Konsep: klasifikasi tak terbimbing dalam tiga kalimat

Klasifikasi mengubah citra yang berisi angka pantulan menjadi peta kelas, misalnya hutan atau sawah. Pada cara **tak terbimbing**, komputer mengelompokkan piksel menurut kemiripan angka bandnya tanpa diberi contoh, seperti menyortir kelereng berdasarkan warna tanpa tahu namanya. Sesudah itu Anda memberi nama tiap kelompok memakai pengetahuan lapangan.

Istilah baru bab ini:

- **Klasifikasi**: mengubah citra menjadi peta kelas.
- **Ruang spektral**: grafik dengan sumbu berupa pantulan band. Satu piksel = satu titik.
- **Kluster**: kelompok piksel yang angka bandnya mirip.
- **K-means**: cara mengelompokkan dengan pusat kluster yang digeser berulang kali.
- **Area latih**: lokasi yang kelas sebenarnya sudah Anda ketahui.

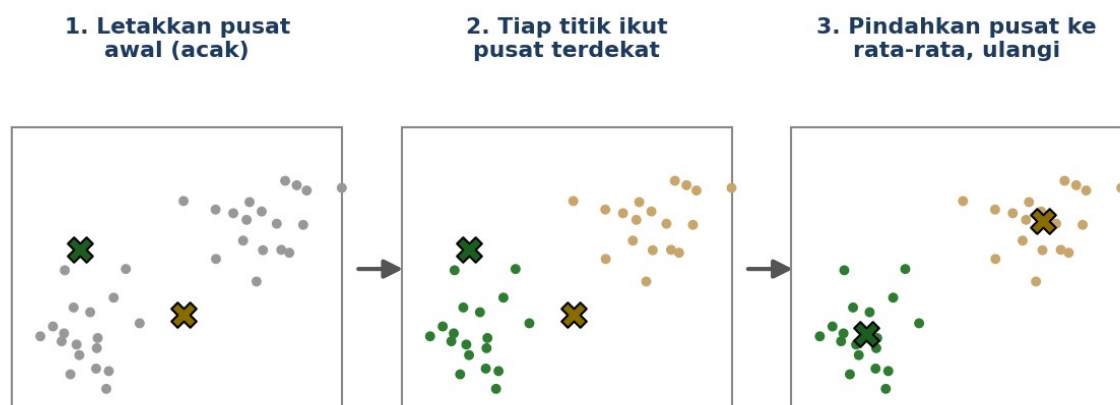
Ilustrasi 4.1: Ruang spektral



Lihat gambar di atas. Hutan (merah rendah, NIR tinggi) dan lahan terbuka (merah tinggi, NIR rendah) jauh terpisah. Kebun dan Sawah berdekatan dan sebagian tumpang tindih. Itulah yang membuat klasifikasi menarik: kelas yang mirip sulit dipisahkan.

K-means bekerja dalam tiga langkah yang diulang: letakkan pusat awal, tiap piksel ikut pusat terdekat, lalu pindahkan pusat ke rata-rata anggotanya. Berhenti bila pusat tidak bergeser lagi.

Ilustrasi 4.2: Langkah k-means



Skema; bukan tangkapan layar

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Klasifikasi tak terbimbing di QGIS

Catatan jujur tentang alat

QGIS punya alat GRASS di Processing, termasuk `i.cluster` (pengelompokan). Pada pengujian penulisan buku ini (QGIS 4.0.2, GRASS 8.4):

- `i.cluster` **berjalan** dan menghasilkan berkas tanda spektral. Alat ini hanya menerima layer satu band per layer, jadi citra empat band harus dipisah dulu menjadi empat berkas, dan berkas tanda spektralnya harus berakhiran `.txt`.
- Langkah berikutnya, `i.maxlik` (menerapkan tanda spektral ke citra), **gagal** dengan pesan "Unable to open signature file". Penyebab pastinya belum diketahui. Kemungkinan pembungkus QGIS belum sesuai dengan cara GRASS 8.4 menyimpan tanda spektral. [kemungkinan]
- Satu catatan penting: `processing.run` pada kegagalan ini **tidak melempar galat**. Skrip tetap jalan seolah berhasil, padahal berkas keluaran tidak ada. Selalu periksa bahwa berkas hasil benar-benar ada.

Karena itu bab ini menulis k-means sendiri dengan NumPy. Isinya pendek, dan Anda jadi tahu persis apa yang terjadi.

A1. Menyiapkan data dan melihat citranya

1. Tambahkan `Citra_Lahan.tif` dari paket-i2 dan `Area_Latih.gpkg`.
2. Buka **Properties ► Symbology**. Pilih **Multiband color**. Isi Red band = 4 (NIR), Green band = 1 (R), Blue band = 2 (G). Ini komposit warna semu: tumbuhan lebat tampak merah muda sampai merah.
3. Perhatikan poligon `Area_Latih`. Ada 24 poligon, 6 untuk tiap kelas (Hutan, Kebun, Sawah, Lahan Terbuka), masing-masing 12 m x 12 m. Anggap itu hasil kunjungan lapangan.

Saat ini `Area_Latih` dipakai hanya untuk **memberi nama** kluster. Di bab 5 ia dipakai untuk melatih.

A2. Menjalankan k-means

4. Buka **Plugins ► Python Console**, klik **Show Editor**, dan buka `i2_04_tak_terbimbing.py`.
5. Ubah dua jalur di bagian atas (`PAKET_I2` dan `HASIL`). Klik **Run**.
6. Skrip mengelompokkan seluruh 90.000 piksel dua kali: 6 kluster, lalu 10 kluster. Skrip mencetak tabel tiap kluster dan menyimpan `tak_terbimbing_k6.tif` dan `tak_terbimbing_k10.tif`.

Inti skrip, yaitu fungsi k-means:

PYTHON

```
def kmeans(x, k, ulang=30, seed=1):
    rng = np.random.default_rng(seed)
    pusat = x[rng.choice(len(x), k, replace=False)]
    for _ in range(ulang):
        jarak = ((x[:, None, :] - pusat[None, :, :]) ** 2).sum(axis=2)
        label = jarak.argmin(axis=1)
        baru = np.array([x[label == i].mean(axis=0) if np.any(label == i) else pusat[i] for i in range(k)])
        if np.allclose(baru, pusat, atol=1e-3):
            break
    pusat = baru
```

```
return label, pusat
```

A3. Membaca tabel dan memberi nama

Hasil uji untuk **6 kluster** (kolom terakhir: jumlah piksel area latih per kelas, urutan Hutan/Kebun/Sawah/Lahan Terbuka):

Kluster	Piksel (persen)	R	G	B	NIR	Piksel latih H/Kb/Sw/LT	Nama
2	14.051 (15,6%)	44,8	86,0	41,0	153,4	335/6/0/0	Hutan
3	21.582 (24,0%)	33,5	74,2	28,3	141,4	529/3/0/0	Hutan
4	43.309 (48,1%)	60,7	104,1	48,1	119,3	0/855/864/0	Sawah (?)
5	3.131 (3,5%)	146,3	128,3	113,6	109,4	0/0/0/308	Lahan Terbuka
6	5.920 (6,6%)	126,6	116,5	95,6	92,0	0/0/0/486	Lahan Terbuka
1	2.007 (2,2%)	110,1	108,7	82,7	79,3	0/0/0/70	Lahan Terbuka

Cara membacanya:

7. Lihat kolom piksel latih. Kluster 2 dan 3 hampir seluruhnya berisi piksel latih Hutan, maka diberi nama Hutan. Kluster 5, 6, dan 1 berisi Lahan Terbuka.
8. Lihat **kluster 4**: ia memuat 855 piksel latih Kebun dan 864 piksel latih Sawah, hampir sama banyak. Satu kluster tidak bisa jadi dua kelas. Skrip memberinya nama Sawah (suara terbanyak, selisih tipis), sehingga **Kebun hilang dari peta**. Nomor kluster boleh berbeda di komputer Anda, tetapi pola ini yang penting.

Hasil uji untuk **10 kluster**:

Kluster	Piksel (persen)	Piksel latih H/Kb/Sw/LT	Nama
3	7.864 (8,7%)	240/0/0/0	Hutan
6	14.670 (16,3%)	372/0/0/0	Hutan
9	9.895 (11,0%)	243/0/0/0	Hutan
2	10.658 (11,8%)	1/351/14/0	Kebun
5	12.387 (13,8%)	8/413/9/0	Kebun
10	10.580 (11,8%)	0/57/366/0	Sawah
1	13.013 (14,5%)	0/43/475/0	Sawah
7	3.037 (3,4%)	0/0/0/297	Lahan Terbuka
8	5.685 (6,3%)	0/0/0/453	Lahan Terbuka
4	2.211 (2,5%)	0/0/0/114	Lahan Terbuka

Dengan kluster lebih banyak, Kebun dan Sawah mulai terpisah. Harga yang dibayar: pekerjaan memberi nama bertambah, dan Anda harus yakin tiap kluster memang satu jenis lahan.

9. Tambahkan `tak_terbimbing_k6.tif` ke QGIS. Buka **Properties ► Symbology ► Paletted/Unique values**, klik **Classify**, lalu beri warna dan nama (1 Hutan, 2 Kebun, 3 Sawah, 4 Lahan Terbuka).

Seberapa benar kedua peta ini, dan mana yang lebih baik? Itu dijawab di bab 6 dengan angka.

Pelajaran dari pelabelan: Memberi nama kluster memakai area latih membuat cara ini **setengah terbimbing**. Itu wajar di praktik, tetapi Anda tidak boleh memakai titik uji (bab 6) untuk memberi nama. Titik uji harus tetap "buta" sampai penilaian.

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

Alat padanannya, menurut dokumentasi Esri, adalah **Iso Cluster Unsupervised Classification** (Spatial Analyst, kelompok **Multivariate**). Alat ini menggabungkan **Iso Cluster** dan **Maximum Likelihood Classification**, dan dapat menghasilkan raster kelas beserta berkas tanda spektral. [CEK]

1. Siapkan citra empat band sebagai satu raster multiband. Alat ini memakai semua band bila masukannya multiband. [CEK]
2. Buka alat **Iso Cluster Unsupervised Classification**. Isi jumlah kelas (misalnya 6), ukuran kelas minimum, dan interval sampel. [CEK]
3. Jalankan, lalu beri nama kluster pada tabel atribut raster hasil. [CEK]
4. Algoritmanya ISODATA, mirip tetapi tidak sama dengan k-means: jumlah kluster akhir bisa berbeda dari angka yang Anda minta. [CEK]
5. Pro juga punya **Classification Wizard** dan alat pada ekstensi **Image Analyst**. Ketersediaan tergantung lisensi Anda. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

Alat **Iso Cluster Unsupervised Classification** ada di **Spatial Analyst Tools ► Multivariate**, bersama **Iso Cluster**, **Create Signatures**, dan **Maximum Likelihood Classification** (nama diperiksa pada dokumentasi Esri). [CEK]

1. Gabungkan band menjadi satu raster dengan **Composite Bands**. [CEK]
2. Jalankan **Iso Cluster Unsupervised Classification**. Isi jumlah kelas dan keluaran. [CEK]
3. Beri nama kelas pada tabel atribut hasil. [CEK]

Cek paham

1. Apa perbedaan utama klasifikasi tak terbimbing dan terbimbing?
2. Mengapa Kebun dan Sawah sulit dipisahkan pada citra ini?
3. Apa yang terjadi bila Anda meminta 10 kluster, bukan 6?

Jawaban:

1. Tak terbimbing: komputer mengelompokkan dulu, manusia memberi nama kemudian.
Terbimbing: manusia memberi contoh kelas lebih dulu.
2. Angka bandnya berdekatan dan saling tumpang tindih pada ruang spektral.
3. Kluster lebih halus, Kebun dan Sawah mulai terpisah, tetapi nama harus diberikan pada lebih banyak kluster.

Kesalahan umum

- **Menganggap satu kluster pasti satu kelas.** Cek dengan area latih. Kluster 4 di atas memuat dua kelas.
- **Menganggap hasil berhasil karena skrip tidak galat.** Periksa berkas keluarannya.
- **Memilih jumlah kluster tanpa dasar.** Mulai dari beberapa kali jumlah kelas yang dicari, lalu gabungkan.
- **Memakai band dengan satuan berbeda tanpa menyamakan.** K-means memakai jarak, jadi band dengan angka besar mendominasi. Di data ini semua band 0 sampai 255.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: klasifikasi tak terbimbing mengelompokkan piksel menurut kemiripan band. Anda yang memberi nama kluster. Kelas yang mirip bisa menyatu. Menambah jumlah kluster membantu memisahkan, tetapi menambah pekerjaan memberi nama.

Latihan:

1. Ubah `JUMLAH_KLUSTER` menjadi `[4, 8]` dan jalankan lagi. Berapa kluster yang memuat piksel latih dua kelas?
2. Ubah `seed` pada fungsi `kmeans` menjadi 2. Apakah tabelnya sama persis? Mengapa?

Tabel perbandingan: klasifikasi tak terbimbing

Hal	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8
Alat	tidak ada alat siap pakai yang lengkap pada uji ini; skrip NumPy (k-means) di buku	Iso Cluster Unsupervised Classification [CEK]	Iso Cluster Unsupervised Classification [CEK]
Algoritma	k-means	ISODATA	ISODATA
Keluaran	raster kelas	raster kelas + berkas tanda spektral [CEK]	raster kelas + berkas tanda spektral [CEK]
Syarat	tanpa ekstensi	Spatial Analyst [CEK]	Spatial Analyst [CEK]

BAB 5: Ajari Citra Mengenal Lahan: Klasifikasi Terbimbing

Studi kasus: "Saya mau empat kelas, dan Kebun tidak boleh hilang"

Peta tak terbimbing di bab 4 menggabungkan Kebun dengan Sawah. Kepala Seksi tegas: keempat kelas harus ada. Anda sudah punya 24 poligon area latih dari kunjungan lapangan. Sekarang giliran Anda mengajari komputer: "Piksel seperti ini, itu Kebun. Piksel seperti itu, itu Sawah."

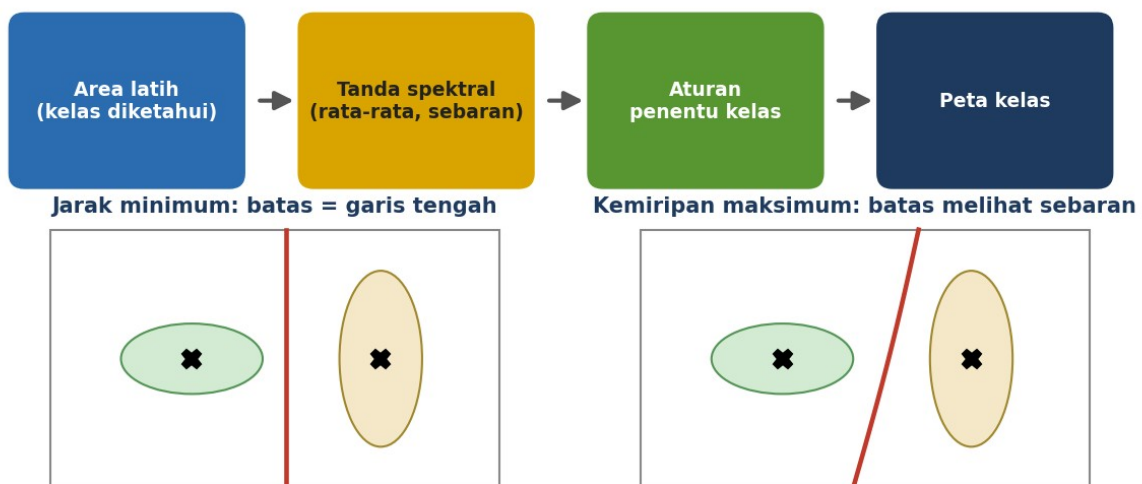
Konsep: klasifikasi terbimbing dalam tiga kalimat

Pada klasifikasi **terbimbing**, Anda memberi contoh lebih dulu (area latih), komputer mempelajari ciri angka bandnya, lalu menerapkannya ke seluruh citra. Seperti melatih petugas baru: tunjukkan beberapa contoh tiap jenis lahan, lalu minta ia menilai sisanya. Hasilnya peta dengan kelas yang Anda tentukan sendiri.

Istilah baru bab ini:

- **Area latih**: poligon berkelas pasti, dipakai untuk belajar.
- **Tanda spektral** (*signature*): ciri angka band satu kelas (rata-rata dan sebarannya).
- **Jarak minimum**: piksel masuk kelas yang rata-ratanya paling dekat.
- **Kemiripan maksimum** (*maximum likelihood*): piksel masuk kelas yang paling mungkin, dengan memperhitungkan sebaran tiap kelas.
- **Kovarians**: ukuran sebaran band dan hubungan antarband di satu kelas.

Ilustrasi 5.1: Alur klasifikasi terbimbing



Skema; bukan tangkapan layar

Perbedaan dua aturan terlihat di gambar. Jarak minimum menarik batas tepat di tengah dua rata-rata. Kemiripan maksimum melihat bahwa satu kelas lebih tersebar dari kelas lain, sehingga batasnya bergeser ke arah kelas yang lebih sempit.

Syarat area latih yang baik: **seragam** (satu kelas saja, jangan di batas), **cukup banyak** (di data ini 864 piksel per kelas), dan **tersebar** di banyak lokasi agar mewakili variasi.

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Klasifikasi terbimbing di QGIS

Untuk klasifikasi, bab ini memakai skrip NumPy. Alasannya sudah dijelaskan di bab 4: pada pengujian, `i.maxlik` dari GRASS gagal membuka berkas tanda spektralnya.

A1. Mengubah area latih menjadi raster

1. Tambahkan `Citra_Lahan.tif` dan `Area_Latih.gpkg`.
2. Buka **Processing Toolbox ► Vector conversion ► Rasterize (vector to raster)**.
3. Isi: **Input layer** = `Area_Latih`, **Field to use for a burn-in value** = `Kode`, **Output raster size units** = Georeferenced units, **Width/Horizontal resolution** = 1, **Height/Vertical resolution** = 1. Pada **Output extent**, pilih **Calculate from layer ► Citra_Lahan**. Pada **Assign a specified nodata value**, isi 0. Pada **Output data type**, pilih Byte.
4. Simpan sebagai `area_latih.tif`, lalu **Run**.

Hasilnya: raster yang bernilai 1 sampai 4 di dalam poligon latih dan 0 di tempat lain. Skrip melakukan langkah ini sendiri.

A2. Menjalankan skrip

5. Buka `i2_05_terbimbing.py` di Python Console (Show Editor). Ubah jalur di bagian atas, lalu **Run**.

Skrip pertama-tama mencetak tanda spektral. Hasil uji (864 piksel latih per kelas):

Kelas	R	G	B	NIR
Hutan	35,4	81,8	35,5	145,8
Kebun	55,7	101,8	46,9	126,5
Sawah	61,3	108,2	50,4	111,3
Lahan Terbuka	133,9	119,3	102,4	96,0

Perhatikan Kebun dan Sawah: rata-ratanya dekat. Di bab 4 itulah yang membuat keduanya menyatu.

A3. Dua aturan penentu kelas

Skrip menghitung dua peta. **Jarak minimum:**

PYTHON

```
jarak = np.stack([(piksel - rata[k]) ** 2).sum(axis=1) for k in NAMA], axis=1)
jarak_min = jarak.argmin(axis=1) + 1
```

Kemiripan maksimum, yang memakai kovarians tiap kelas:

PYTHON

```
def skor(x, mu, c):
    d = x - mu
    return -0.5 * np.einsum("ij,jk,ik->i", d, np.linalg.inv(c), d) - 0.5 * np.log(np.linalg.det(c))
```

```
kemiripan = np.stack([skor(piksel, rata[k], kov[k]) for k in NAMA], axis=1)
maks_lik = kemiripan.argmax(axis=1) + 1
```

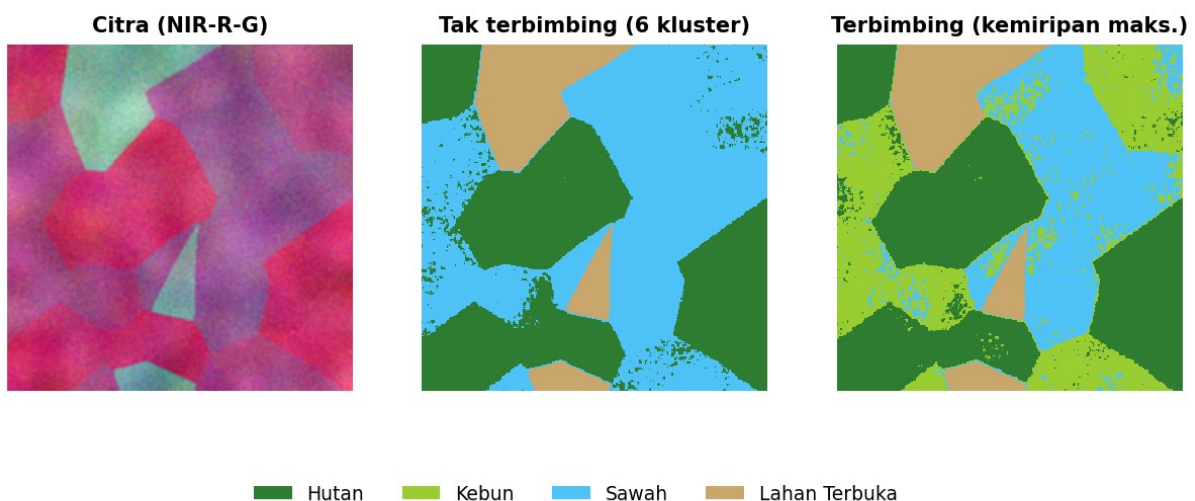
Skor tertinggi menang. Dua hal di sini diasumsikan: tiap kelas bersebaran seperti lonceng (normal), dan semua kelas sama mungkin muncul (peluang awal sama).

Hasil uji, jumlah piksel per kelas pada peta:

Kelas	Jarak minimum	Kemiripan maksimum
Hutan	33.484	33.415
Kebun	23.204	23.194
Sawah	22.470	22.447
Lahan Terbuka	10.842	10.944

Sekarang keempat kelas ada. Kebun tidak lagi hilang.

Ilustrasi 5.2: Peta hasil



Skema; bukan tangkapan layar (gambar dari hasil skrip pada data sintetis)

6. Muat `terbimbing_maks_lik.tif` ke QGIS. Beri warna lewat **Properties ► Symbology ► Paletted/Unique values**, lalu **Classify**.

Perbedaan angka kedua aturan kecil. Mana yang benar-benar lebih akurat? Jangan menilainya dari mata. Bab 6 mengukurnya dengan titik uji yang tidak ikut dipakai untuk melatih.

Mengapa tidak menilai dari data latih?: Bila Anda menguji peta dengan piksel yang sama dengan yang dipakai melatih, hasilnya terlalu bagus dan menyesatkan, seperti murid yang diuji dengan soal latihannya sendiri. Karena itu titik uji dipisah dan berada di luar area latih.

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

Menurut dokumentasi Esri, ada dua jalur. [CEK]

- **Spatial Analyst:** buat berkas tanda spektral dari area latih dengan **Create Signatures**, lalu jalankan **Maximum Likelihood Classification**. [CEK]
- **Image Analyst:** **Train Maximum Likelihood Classifier**, lalu **Classify Raster**. Atau pakai **Classification Wizard** di tab Imagery, yang memandu pelatihan sampai hasil. [CEK]

Langkah ringkas:

1. Siapkan area latih (poligon dengan field kelas). Samakan sistem koordinat dengan citra. [CEK]
2. Buat tanda spektral dari area latih. [CEK]
3. Jalankan klasifikasi kemiripan maksimum. [CEK]
4. Aturan jarak minimum: padanan alat langsung tidak saya temukan pada pemeriksaan ini. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

Alat ada di **Spatial Analyst Tools ► Multivariate: Create Signatures** dan **Maximum Likelihood Classification** (nama diperiksa pada dokumentasi Esri). [CEK]

1. Siapkan area latih sebagai poligon dengan field kelas. [CEK]
2. Jalankan **Create Signatures** dengan raster masukan multiband dan sampel area latih. [CEK]
3. Jalankan **Maximum Likelihood Classification** dengan berkas tanda spektral tadi. [CEK]
4. ArcMap juga punya bilah **Image Classification** dengan **Training Sample Manager** untuk menggambar area latih. [CEK]

Cek paham

1. Apa isi "tanda spektral" suatu kelas?
2. Apa beda jarak minimum dan kemiripan maksimum?
3. Mengapa area latih harus berada di tengah bercak yang seragam?

Jawaban:

1. Rata-rata tiap band dan sebarannya (kovarians) dari piksel latih kelas itu.
2. Jarak minimum hanya melihat jarak ke rata-rata. Kemiripan maksimum juga memperhitungkan seberapa tersebar tiap kelas.
3. Piksel di batas campuran dua kelas. Bila ikut melatih, tanda spektral jadi kabur.

Kesalahan umum

- **Area latih terlalu sedikit atau terlalu kecil.** Kovarians tidak stabil. Pakai ratusan piksel per kelas, dari beberapa lokasi.

- **Area latih satu lokasi saja.** Variasi kelas tidak terwakili. Sebarkan.
- **Menguji dengan data latih.** Akurasi menjadi terlalu bagus. Pakai titik uji terpisah.
- **Kelas tidak ada di area latih.** Piksel kelas itu akan dipaksakan masuk kelas lain.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: klasifikasi terbimbing belajar dari area latih. Tanda spektral berisi rata-rata dan kovarians. Jarak minimum sederhana. Kemiripan maksimum lebih teliti. Keduanya menghasilkan peta dengan empat kelas yang Anda tentukan.

Latihan:

1. Kurangi area latih menjadi 2 poligon per kelas (hapus sisanya di salinan `Area_Latih`). Bagaimana jumlah piksel per kelas berubah?
2. Tambahkan band NDVI (dari bab 1) sebagai band ke lima di skrip. Apa yang perlu diubah di `piksel`?

Tabel perbandingan: klasifikasi terbimbing

Hal	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8
Alat	skrip NumPy di buku (GRASS <code>i.maxlik</code> gagal pada uji)	Create Signatures + Maximum Likelihood Classification; atau Train Maximum Likelihood Classifier + Classify Raster [CEK]	Create Signatures + Maximum Likelihood Classification [CEK]
Jarak minimum	skrip	tidak ditemukan alat langsung [CEK]	tidak ditemukan alat langsung [CEK]
Panduan langkah	tidak ada	Classification Wizard [CEK]	bilah Image Classification [CEK]
Syarat	tanpa ekstensi	Spatial Analyst / Image Analyst [CEK]	Spatial Analyst [CEK]

BAB 6: Seberapa Benar Peta Ini? Uji Akurasi

Studi kasus: "Bisa dipercaya, tidak?"

Anda punya empat peta: dua hasil tak terbimbing dan dua hasil terbimbing. Kepala Seksi bertanya, "Pakai yang mana, dan seberapa yakin?" Jawaban "kelihatannya bagus" tidak cukup. Anda butuh angka yang bisa dipertanggungjawabkan. Caranya: bandingkan peta dengan kenyataan di 100 titik uji yang sengaja tidak dipakai untuk melatih.

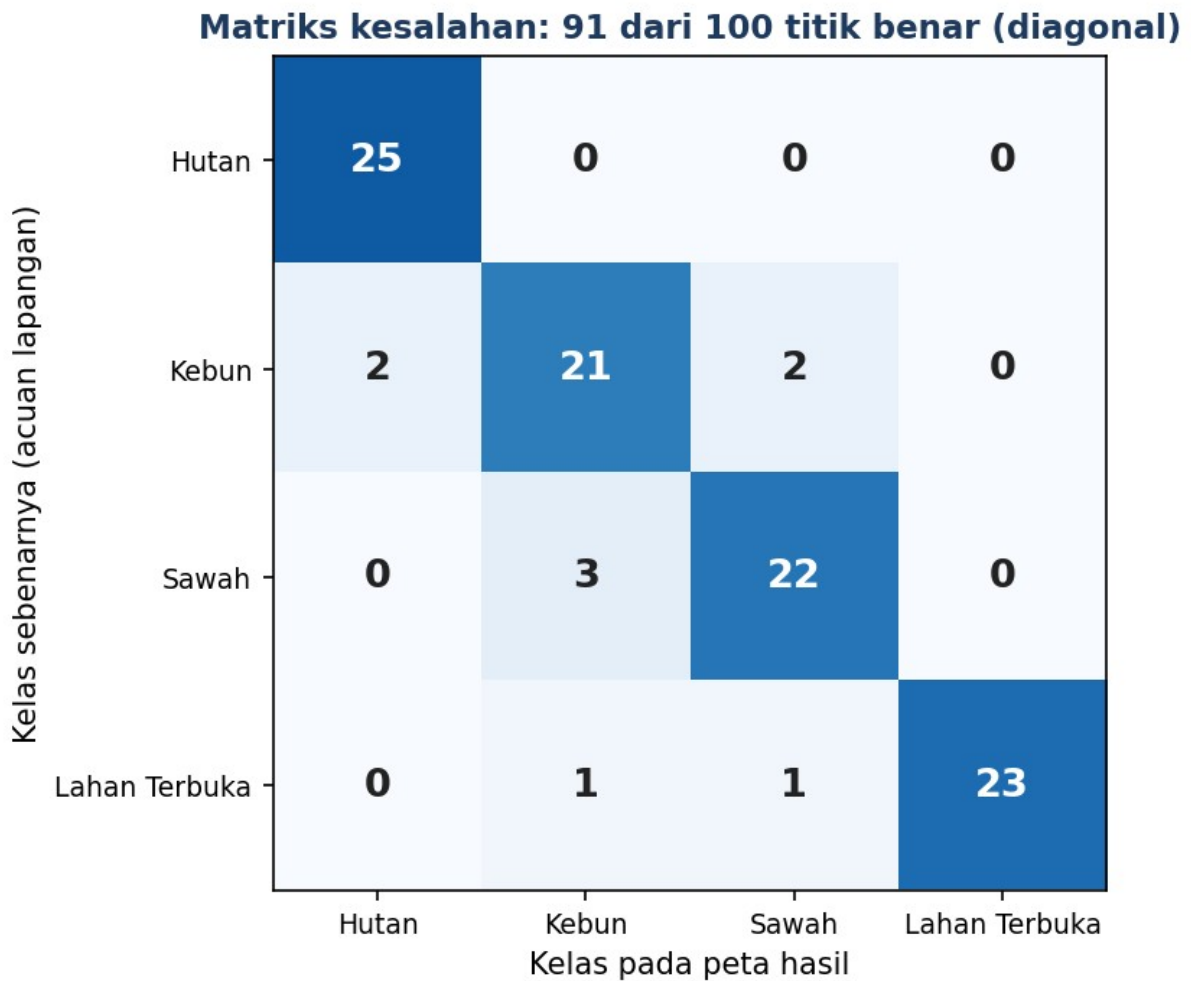
Konsep: uji akurasi dalam tiga kalimat

Uji akurasi membandingkan kelas pada peta dengan kelas sebenarnya di sejumlah titik uji, lalu merangkumnya dalam **matriks kesalahan**. Bayangkan ujian: soal (titik uji) harus berbeda dari soal latihan (area latih), dan kunci jawaban (acuan lapangan) harus dipercaya. Dari matriks itu keluar tiga angka utama: akurasi keseluruhan, akurasi pembuat dan pengguna, serta kappa.

Istilah baru bab ini:

- **Titik uji**: titik dengan kelas sebenarnya (acuan) yang tidak ikut melatih.
- **Matriks kesalahan** (*confusion matrix*): tabel kelas acuan lawan kelas peta.
- **Akurasi keseluruhan** (*overall accuracy*): titik benar dibagi semua titik.
- **Akurasi pembuat dan pengguna**: ketepatan dilihat dari sisi lapangan dan dari sisi peta.
- **Kappa**: kecocokan setelah dikurangi kecocokan karena kebetulan.

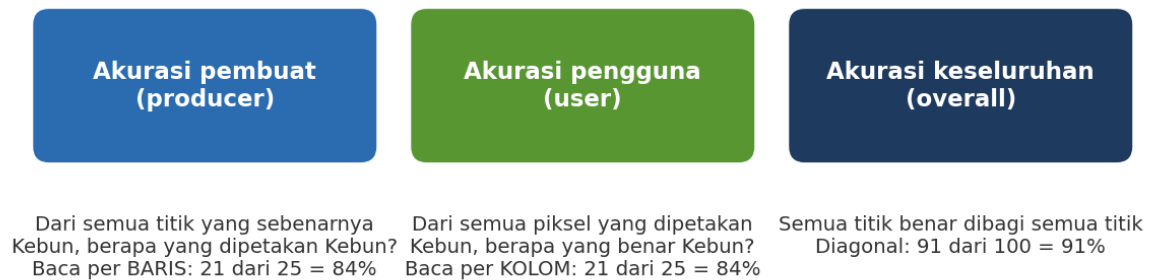
Ilustrasi 6.1: Matriks kesalahan



Skema; bukan tangkapan layar (angka dari skrip uji akurasi)

Cara membaca: **baris** adalah kelas sebenarnya, **kolom** adalah kelas pada peta. Angka di diagonal (kiri atas ke kanan bawah) adalah titik yang benar. Angka di luar diagonal adalah salah. Misalnya baris Kebun: dari 25 titik yang sebenarnya Kebun, 21 dipetakan Kebun, 2 dipetakan Hutan, dan 2 dipetakan Sawah.

Ilustrasi 6.2: Tiga akurasi



Skema; bukan tangkapan layar

Rumus yang dipakai, dengan contoh angka dari matriks di atas:

- **Akurasi keseluruhan** = jumlah diagonal ÷ jumlah semua titik = $(25 + 21 + 22 + 23) \div 100 = 91\%$.
- **Akurasi pembuat** kelas X = diagonal ÷ jumlah baris X. Untuk Hutan: $25 \div 25 = 100\%$. Artinya, dari yang benar-benar Hutan, semua tertangkap. Kebalikannya disebut galat penghilangan (*omission*).
- **Akurasi pengguna** kelas X = diagonal ÷ jumlah kolom X. Untuk Hutan: $25 \div 27 = 93\%$. Artinya, dari yang ditandai Hutan di peta, 93% benar. Kebalikannya disebut galat penambahan (*commission*).
- **Kappa** = $(\text{akurasi keseluruhan} - p) \div (1 - p)$, dengan p kecocokan yang diharapkan secara kebetulan. Di sini $p = 0,25$, jadi $\text{kappa} = (0,91 - 0,25) \div 0,75 = 0,88$.

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Uji akurasi di QGIS

A1. Mengambil kelas peta pada titik uji

1. Tambahkan `Titik_Uji.gpkg` (100 titik; field `Kode_Acuan` adalah kelas sebenarnya) dan peta yang ingin dinilai, misalnya `terbimbing_maks_lik.tif`.
2. Buka **Processing Toolbox** ► **Raster analysis** ► **Sample raster values**. Isi **Input layer** = `Titik_Uji`, **Raster layer** = peta kelas, **Output column prefix** = `Peta_`. Jalankan.
3. Layer hasil punya field baru `Peta_1`: kelas pada peta di titik itu.

A2. Akurasi keseluruhan dengan satu seleksi

4. Pada layer hasil, buka **Select by Expression** (Ctrl+F3). Ketik:

EKSPRESI

```
"Kode_Acuan" = "Peta_1"
```

5. Klik **Select Features**. Baca di bilah status: **91 terpilih** dari 100. Itulah akurasi keseluruhan 91%.

A3. Matriks kesalahan

6. Buka **Processing Toolbox** ► **Vector analysis** ► **Statistics by categories**. Pada **Field(s) with categories**, pilih `Kode_Acuan` dan `Peta_1`. Pada **Field to calculate statistics on**, pilih `ID_Uji`.
7. Hasilnya tabel panjang. Tiap baris adalah satu kombinasi kelas acuan dan kelas peta, dengan kolom `count` (jumlah titik). Pada uji, hasilnya 9 baris (hanya kombinasi yang ada). Susun menjadi matriks seperti gambar di atas.

A4. Dengan skrip, dan cara kedua dengan GRASS

8. Buka `i2_06_uji_akurasi.py`, ubah jalur, dan jalankan. Skrip menilai keempat peta dan mencetak matriks.
9. Skrip juga menjalankan alat GRASS **r.kappa** sebagai pembanding (Processing Toolbox, kelompok **Raster (r.*)**). Alat ini membandingkan dua raster: peta hasil dan raster acuan yang dibuat dari titik uji (**Rasterize**, nilai `Kode_Acuan`; piksel tanpa titik bernilai 0 dan diabaikan).

Hasil `r.kappa` untuk peta kemiripan maksimum: kappa **0,88** dan **91 dari 100** benar. Sama persis dengan hitungan skrip NumPy, jadi dua cara saling membenarkan. Hati-hati membacanya: laporan `r.kappa` menaruh kelas **acuan di kolom** dan kelas peta di baris, kebalikan dari gambar di buku ini.

A5. Hasil uji keempat peta

Peta	Akurasi keseluruhan	Kappa
Tak terbimbing, 6 kluster	75% (75 dari 100)	0,67
Tak terbimbing, 10 kluster	98% (98 dari 100)	0,97
Terbimbing, jarak minimum	88% (88 dari 100)	0,84
Terbimbing, kemiripan maksimum	91% (91 dari 100)	0,88

Untuk peta kemiripan maksimum, akurasi per kelas:

Kelas	Akurasi pembuat	Akurasi pengguna
Hutan	100%	93%
Kebun	84%	84%
Sawah	88%	88%
Lahan Terbuka	92%	100%

A6. Membaca hasilnya dengan jujur

- **Peta 6 kluster:** kelas Kebun tidak ada di peta (kolomnya kosong), jadi akurasi pembuat Kebun = 0%. Dari 25 titik Kebun, 18 menjadi Sawah dan 7 menjadi Hutan. Akurasi keseluruhan 75% terlihat lumayan, tetapi satu kelas hilang. **Jangan hanya menatap angka keseluruhan.**
- **Peta 10 kluster paling tinggi (98%).** Namun ada tiga catatan. (1) Hanya 100 titik: satu titik berarti 1 poin persen. Perkiraan selang 95% (simpangan baku sederhana, memakai rumus $p \pm 1,96 \times \sqrt{p(1-p)/n}$) untuk 91% adalah kira-kira 85% sampai 97%, dan untuk 98% kira-kira 95% sampai 100%. Dua selang itu bertumpang tindih, jadi **selisihnya belum tentu nyata**. (2) Pemberian nama 10 kluster memakai area latih, jadi caranya sudah setengah terbimbing. (3) Data ini sintetis dan bersih. Pada data sungguhan, hasil terbimbing dan tak terbimbing jarang sedekat ini.
- **Jarak minimum dan kemiripan maksimum:** 88% lawan 91%. Kemiripan maksimum sedikit lebih baik, tetapi selisih tiga titik juga masih dalam wilayah ketidakpastian.
- **Kebun dan Sawah** paling sering tertukar, sesuai dugaan dari ruang spektral di bab 4.

Batas penilaian ini: Titik uji di sini dipilih acak berstrata: 25 per kelas, di luar area latih. Cara ini mudah dan cukup untuk belajar. Penilaian resmi yang menaksir luas tiap kelas memerlukan pembobotan menurut luas kelas dan titik acuan yang diverifikasi di lapangan. Hal itu tidak dibahas di buku ini.

A7. Latihan terpadu: lahan terbuka di lereng curam

Dua analisis kini bisa digabung. Berapa lahan terbuka yang berada di lereng curam (di atas 25 persen)? Peta kelas berpixel 1 m (area 300 m x 300 m) dan kemiringan berpixel 2 m (area 400 m x 400 m). Raster Calculator sanggup menggabungkannya bila ukuran dan luas keluaran ditentukan (bab 1). Ekspresinya:

EKSPRESI

```
("peta_kelas@1" = 4) AND ("slope_persen@1" > 25)
```

Pilih ukuran piksel dan luas mengikuti `peta_kelas`. Skrip `i2_07_terpadu.py` melakukannya. Hasil uji pada peta kemiripan maksimum: **7.709 piksel = 0,771 ha**, atau **70,4%** dari seluruh lahan terbuka pada peta (1,094 ha). Hitungan mandiri dengan NumPy memberi jumlah piksel yang sama.

Jawaban untuk Kepala Seksi: sekitar tujuh dari sepuluh bagian lahan terbuka di area citra berada di lereng curam. Itu kandidat pertama untuk kegiatan rehabilitasi atau pengendalian erosi. Ingat, ini data sintetis, jadi angkanya hanya untuk belajar.

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

Menurut dokumentasi Esri, alur uji akurasi memakai tiga alat berurutan: **Create Accuracy Assessment Points**, **Update Accuracy Assessment Points**, lalu **Compute Confusion Matrix**. Keluarannya matriks kesalahan, akurasi pengguna dan pembuat, serta kappa. [CEK]

1. Buat titik uji dari peta kelas dengan **Create Accuracy Assessment Points**. Alat ini membuat titik acak dengan field `Classified` dan `GrndTruth`. [CEK]
2. Isi kelas sebenarnya di tiap titik dengan **Update Accuracy Assessment Points**. [CEK]
3. Jalankan **Compute Confusion Matrix** pada titik itu. [CEK]
4. Bila Anda sudah punya titik uji berkelas sendiri (seperti `Titik_Uji`), pakai nilai peta pada titik itu dengan **Extract Values to Points**, lalu rangkum. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

Alat yang sama tersedia di Spatial Analyst (nama alat diperiksa pada dokumentasi Esri). Cocokkan dengan versi Anda. [CEK]

1. **Create Accuracy Assessment Points**: membuat titik acak. [CEK]
2. **Update Accuracy Assessment Points**: mengisi kelas sebenarnya. [CEK]
3. **Compute Confusion Matrix**: menghitung matriks, akurasi pengguna dan pembuat, serta kappa. [CEK]

Cek paham

1. Pada matriks kesalahan, di mana titik yang benar berada?
2. Apa beda akurasi pembuat dan akurasi pengguna?
3. Mengapa titik uji tidak boleh sama dengan area latih?

Jawaban:

1. Di diagonal, yaitu kelas acuan sama dengan kelas peta.

2. Pembuat: dari yang benar di lapangan, berapa yang terpetakan benar (per baris). Pengguna: dari yang dipetakan kelas itu, berapa yang benar di lapangan (per kolom).
3. Menguji dengan soal latihan membuat akurasi terlalu optimistis. Titik uji harus bebas dari proses pelatihan.

Kesalahan umum

- **Hanya melihat akurasi keseluruhan.** Satu kelas bisa hilang (seperti Kebun pada peta 6 kluster) dan angka keseluruhan tetap tampak baik. Lihat akurasi per kelas.
- **Terlalu sedikit titik uji.** Angkanya goyah. Sertakan selang ketidakpastian.
- **Salah membaca baris dan kolom.** Pastikan alat mana yang menaruh acuan di baris dan mana di kolom (QGIS di buku ini dan r.kappa berbeda).
- **Titik uji dekat batas kelas atau di area latih.** Hasil bias. Pilih titik di tengah bercak dan di luar area latih.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: matriks kesalahan membandingkan peta dengan kenyataan di titik uji. Dari situ didapat akurasi keseluruhan, akurasi pembuat dan pengguna, dan kappa. Pada data ini peta terbimbing kemiripan maksimum mencapai 91% (kappa 0,88), peta 10 kluster 98%, dan peta 6 kluster hanya 75% karena Kebun hilang. Selang ketidakpastian dengan 100 titik cukup lebar.

Latihan:

1. Hitung sendiri akurasi pembuat dan pengguna Sawah pada peta jarak minimum dari matriks: baris Sawah [0, 4, 21, 0], kolom Sawah berisi 0, 0, 21, 1. (Jawaban: 84% dan 95%.)
2. Hitung kappa peta jarak minimum. Gunakan $p = 0,25$ (jumlah baris tiap kelas 25 dan jumlah kolom 28, 26, 22, 24 sehingga $p = 25 \times 100 \div 10.000$). Apakah hasilnya mendekati 0,84?
3. Jalankan ulang skrip uji akurasi dengan peta `tak_terbimbing_k6.tif` saja. Kelas mana yang kolomnya kosong?

Tabel perbandingan: uji akurasi

Hal	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8
Titik uji	Titik_Uji (sudah ada) atau buat titik acak	Create Accuracy Assessment Points [CEK]	Create Accuracy Assessment Points [CEK]
Kelas peta di titik	Sample raster values	otomatis pada alat di atas [CEK]	otomatis pada alat di atas [CEK]
Matriks dan kappa	Statistics by categories, skrip NumPy, atau GRASS r.kappa	Compute Confusion Matrix [CEK]	Compute Confusion Matrix [CEK]
Syarat	tanpa ekstensi	Spatial Analyst / Image Analyst [CEK]	Spatial Analyst [CEK]

Lanjut belajar

Seri berikutnya adalah **I3: Survei Lapangan dan Basis Data**. Pindai kode QR ini untuk membuka halaman seri tersebut dan unduhannya.



Glosarium

Glosarium ini memuat istilah teknis yang dipakai di buku ini, diurutkan menurut abjad. Angka di akhir tiap entri menunjuk bab tempat istilah itu pertama kali dijelaskan.

Acuan (reference): kelas sebenarnya di lapangan pada sebuah titik uji. Peta dinilai dengan membandingkannya terhadap acuan. *Bab 6.*

Akurasi keseluruhan (overall accuracy): jumlah titik uji yang benar dibagi jumlah semua titik uji. *Bab 6.*

Akurasi pembuat (producer's accuracy): untuk satu kelas, titik yang benar dibagi jumlah baris kelas itu pada matriks kesalahan. Ia menjawab: dari yang benar-benar kelas itu di lapangan, berapa yang tertangkap di peta. *Bab 6.*

Akurasi pengguna (user's accuracy): untuk satu kelas, titik yang benar dibagi jumlah kolom kelas itu pada matriks kesalahan. Ia menjawab: dari yang ditandai kelas itu di peta, berapa yang benar di lapangan. *Bab 6.*

Aljabar raster (raster algebra): berhitung pada raster, yaitu rumus yang dijalankan di setiap piksel pada letak yang sama, lalu hasilnya menjadi raster baru. *Bab 1.*

Alpha (band alpha): band yang menandai transparansi. GDAL menandai band keempat `Citra_Komposit.tif` demikian, tetapi perhitungan tetap memakainya sebagai angka biasa. *Bab 1.*

Ambang (threshold): batas nilai yang dipilih untuk memisahkan dua keadaan, misalnya NDVI di atas 0,3 dianggap bervegetasi. Tentukan ambang dari data dan tujuan Anda. *Bab 1.*

Arah lereng (aspect): arah hadap lereng, diukur dari utara searah jarum jam. Nilai 0° berarti utara, 90° timur, 180° selatan, 270° barat. *Bab 2.*

Area latih (training area): poligon dengan kelas yang sudah pasti, dipakai komputer untuk belajar ciri tiap kelas. Pada klasifikasi tak terbimbing ia hanya dipakai untuk memberi nama kluster. *Bab 4, 5.*

Aturan batas (range boundaries): ketentuan apakah nilai yang tepat di batas masuk kelas bawah atau kelas atas. Di buku ini nilai itu masuk kelas bawah. *Bab 3.*

Azimuth: arah datangnya sinar matahari buatan pada hillshade, diukur dalam derajat dari utara. Buku ini memakai 315. *Bab 2.*

CHM (canopy height model): tinggi tajuk, yaitu DSM dikurangi DTM, dihitung piksel demi piksel. *Bab 1.*

Citra komposit warna semu (false color composite): tampilan citra dengan band NIR diberi warna merah, band merah diberi warna hijau, dan band hijau diberi warna biru. Tumbuhan lebat tampak merah muda sampai merah. *Bab 4.*

Data sintetis: data buatan untuk belajar. Hasil analisisnya bukan kondisi lapangan sebenarnya. *Pendahuluan.*

DEM (digital elevation model): raster yang tiap pikselnya menyimpan tinggi tanah. *Bab 2.*

Diagonal (matriks kesalahan): deretan sel dari kiri atas ke kanan bawah pada matriks kesalahan. Isinya titik yang benar, yaitu kelas acuan sama dengan kelas peta. *Bab 6.*

DSM (digital surface model): model permukaan, dari berkas hasil terbang drone. *Bab 1.*

DTM (digital terrain model): model tanah, dari berkas hasil terbang drone. *Bab 1.*

Ekspresi (expression): rumus yang Anda tulis di Raster Calculator, misalnya "A@1" - "B@1". *Bab 1.*

Faktor Z (Z factor): pengali tinggi bila satuan tinggi dan satuan peta berbeda. Pada DEM berkoordinat meter dengan tinggi meter, faktor Z = 1. *Bab 2.*

Galat penambahan (commission error): kebalikan akurasi pengguna, yaitu hal yang ditandai suatu kelas di peta padahal bukan kelas itu di lapangan. *Bab 6.*

Galat penghilangan (omission error): kebalikan akurasi pembuat, yaitu titik yang sebenarnya suatu kelas tetapi tidak dipetakan sebagai kelas itu. *Bab 6.*

Hillshade (bayangan bukit): gambar bayangan dari sinar matahari buatan. Ia hanya tampilan, bukan data untuk dianalisis. *Bab 2.*

Histogram zonal (zonal histogram): jumlah piksel tiap kelas di dalam tiap zona. *Bab 3.*

Image Analyst: ekstensi Esri untuk ArcGIS Pro yang berisi alat analisis raster. Ketersediaannya bergantung pada lisensi Anda. *Pendahuluan.*

ISODATA: algoritma pengelompokan pada alat Esri. Mirip k-means, tetapi jumlah kluster akhir bisa berbeda dari angka yang diminta. *Bab 4.*

Jarak minimum (minimum distance): aturan klasifikasi terbimbing yang memasukkan piksel ke kelas yang rata-ratanya paling dekat. *Bab 5.*

Kappa: ukuran kecocokan peta dengan acuan setelah dikurangi kecocokan karena kebetulan. *Bab 6.*

Kemiringan (slope): sudut miring permukaan, dalam derajat atau persen. Dihitung dari selisih tinggi piksel yang bertetangga. *Bab 2.*

Kemiringan persen: kemiringan dalam persen, yaitu $\tan(\text{derajat}) \times 100$. Lereng 45° sama dengan 100%. *Bab 2.*

Kemiripan maksimum (maximum likelihood): aturan klasifikasi terbimbing yang memasukkan piksel ke kelas yang paling mungkin, dengan memperhitungkan sebaran tiap kelas. *Bab 5.*

Klasifikasi (classification): mengubah citra yang berisi angka pantulan menjadi peta kelas, misalnya hutan atau sawah. *Bab 4.*

Klasifikasi tak terbimbing (unsupervised classification): klasifikasi ketika komputer mengelompokkan piksel menurut kemiripan angka bandnya tanpa contoh, lalu Anda memberi nama kelompoknya. *Bab 4.*

Klasifikasi terbimbing (supervised classification): klasifikasi ketika Anda memberi contoh kelas lebih dulu (area latih), lalu komputer menerapkannya ke seluruh citra. *Bab 5.*

Kluster (cluster): kelompok piksel yang angka bandnya mirip. *Bab 4.*

K-means: cara mengelompokkan piksel dengan meletakkan pusat kluster, menugaskan tiap piksel ke pusat terdekat, lalu memindahkan pusat ke rata-rata anggotanya. Langkah diulang sampai pusat tidak bergeser. *Bab 4.*

Kovarians (covariance): ukuran sebaran band dan hubungan antarband di dalam satu kelas. *Bab 5.*

KPH Contoh: kantor pengelola hutan fiktif tempat cerita buku ini berlangsung. Terdiri atas tiga petak: Alpha, Beta, dan Gamma. *Pendahuluan.*

Matriks kesalahan (confusion matrix): tabel kelas acuan lawan kelas peta. Baris adalah kelas sebenarnya dan kolom adalah kelas pada peta. *Bab 6.*

Metode Horn: cara menghitung kemiringan dari tetangga 3 x 3 piksel. Hitungan mandiri dengan metode ini cocok dengan Slope QGIS pada piksel bagian dalam. *Bab 2.*

NDVI (normalized difference vegetation index): ukuran kehijauan dengan rumus $(NIR - R) \div (NIR + R)$. *Bab 1.*

NIR (near infrared): inframerah dekat, band yang dipakai bersama band merah untuk menghitung NDVI. *Bab 1.*

NoData: piksel tanpa nilai. Bila satu piksel masukan NoData, hasil hitungan di letak itu juga NoData. *Bab 1.*

Perbandingan logika (logical comparison): ekspresi seperti " $x@1 > 5$ " yang menghasilkan 1 bila benar dan 0 bila salah. *Bab 1.*

Raster Calculator: alat untuk menjalankan aljabar raster. Di QGIS ada pada menu **Raster**. *Bab 1.*

Reklasifikasi (reclassification): mengganti rentang angka menjadi kelas, seperti mengubah nilai ujian menjadi huruf. *Bab 3.*

Ruang spektral (spectral space): grafik dengan sumbu berupa pantulan band, tempat satu piksel menjadi satu titik. *Bab 4.*

Selang ketidakpastian (confidence interval): rentang perkiraan akurasi sebenarnya. Dengan 100 titik uji, selangnya cukup lebar. *Bab 6.*

Setengah terbimbing (semi-supervised): sebutan untuk klasifikasi tak terbimbing yang kluster-klusternya diberi nama memakai area latih. *Bab 4.*

Spatial Analyst: ekstensi Esri untuk analisis raster di ArcGIS Pro dan ArcMap. Alatnya umumnya butuh ekstensi ini. *Pendahuluan.*

Statistik zona (zonal statistics): perhitungan isi raster di dalam tiap poligon, misalnya berapa piksel tiap kelas di tiap petak. *Bab 3.*

Tabel reklasifikasi: daftar rentang awal, rentang akhir, dan kelas baru yang dipakai saat reklasifikasi. *Bab 3.*

Tanda spektral (signature): ciri angka band satu kelas, yaitu rata-rata dan sebarannya. *Bab 5.*

Titik uji (test point): titik dengan kelas sebenarnya yang tidak ikut melatih, dipakai untuk menilai akurasi peta. *Bab 6.*

Vertical angle (sudut tinggi): tinggi sinar matahari buatan di atas cakrawala pada hillshade. Buku ini memakai 45. *Bab 2.*

Zona (zone): poligon tempat raster dirangkum. Di buku ini zona adalah petak KPH. *Bab 3.*

Daftar Pustaka

Daftar ini memuat sumber yang dipakai menyusun buku ini. Semua tautan dibuka dan dicek pada 7 Oktober 2026. Halaman dokumentasi yang selalu diperbarui diberi tahun (t.t.) karena tahun terbitnya tidak tertera.

Dokumentasi resmi

- Esri. (t.t.). *Compute Confusion Matrix (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/compute-confusion-matrix.html>.
- Esri. (t.t.). *Create Accuracy Assessment Points (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/create-accuracy-assessment-points.html>.
- Esri. (t.t.). *Create Signatures (Spatial Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/create-signatures.html>.
- Esri. (t.t.). *Iso Cluster Unsupervised Classification (Spatial Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/iso-cluster-unsupervised-classification.html>.
- Esri. (t.t.). *Iso Cluster Unsupervised Classification (Spatial Analyst)—ArcMap*. ArcMap documentation. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/iso-cluster-unsupervised-classification.htm>.
- Esri. (t.t.). *Maximum Likelihood Classification (Spatial Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/maximum-likelihood-classification.html>.
- Esri. (t.t.). *Raster Calculator (Spatial Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/raster-calculator.html>.
- Esri. (t.t.). *Reclassify (Spatial Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/reclassify.html>.
- Esri. (t.t.). *Slope (Spatial Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/slope.html>.
- Esri. (t.t.). *Tabulate Area (Spatial Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/tabulate-area.html>.
- Esri. (t.t.). *Train Maximum Likelihood Classifier (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/train-maximum-likelihood-classifier.html>.
- Esri. (t.t.). *Update Accuracy Assessment Points (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/update-accuracy-assessment-points.html>.
- GRASS Development Team. (t.t.). *i.cluster: Generates spectral signatures for land cover types in an image using a clustering algorithm*. GRASS GIS 8.4 Manual. <https://grass.osgeo.org/grass84/manuals/i.cluster.html>.

- GRASS Development Team. (t.t.). *i.maxlik: Classifies the cell spectral reflectances in imagery data*. GRASS GIS 8.4 Manual. <https://grass.osgeo.org/grass84/manuals/i.maxlik.html>.
- GRASS Development Team. (t.t.). *r.kappa: Calculates error matrix and kappa parameter for accuracy assessment of classification result*. GRASS GIS 8.4 Manual. <https://grass.osgeo.org/grass84/manuals/r.kappa.html>.
- QGIS Project. (t.t.). *Raster analysis* (bagian Raster Calculator, Reclassify by table, Sample raster values, Zonal histogram). QGIS Documentation, versi latest (3.44 saat dibuka). https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasteranalysis.html.
- QGIS Project. (t.t.). *Raster Analysis* (Raster Calculator). QGIS Documentation, versi latest (3.44 saat dibuka). https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/working_with_raster/raster_analysis.html.
- QGIS Project. (t.t.). *Raster terrain analysis* (Slope, Aspect, Hillshade). QGIS Documentation, versi latest (3.44 saat dibuka). https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasterterrainanalysis.html.
- QGIS Project. (t.t.). *Vector analysis* (Statistics by categories). QGIS Documentation, versi latest (3.44 saat dibuka). https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectoranalysis.html.
- QGIS Project. (t.t.). *Vector conversion* (Rasterize (vector to raster)). QGIS Documentation, versi latest (3.44 saat dibuka). https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/processing_algs/gdal/vectorconversion.html.

Aplikasi Live Penulis

Berikut aplikasi web milik penulis yang bisa Anda buka langsung. Daftar ini dicek pada 7 Oktober 2026. Sumbernya bagian Aplikasi Live di <https://badarmubarok.id/#aplikasi-live>.

No.	Aplikasi	Tautan
1	SIM RHL — Sistem Informasi Manajemen Rehabilitasi Hutan dan Lahan (Fakultas Kehutanan UGM), Versi PC	https://simrhl.badarmubarok.id
2	SIM RHL, Versi HP	https://m.simrhl.badarmubarok.id
3	ScienceThink — RAD Tool (Rapid Application Development)	https://sciencethink.badarmubarok.id
4	Peta Landsystem Indonesia — peta landsystem dan peta tematik lainnya	https://landsystem.badarmubarok.id
5	Analisis Kebutuhan Unsur Hara — aplikasi Web GIS analisis unsur hara	https://unsurhara.badarmubarok.id
6	Analisa Karbon — Web GIS estimasi cadangan karbon dari citra satelit	https://karbon.badarmubarok.id
7	Aplikasi Deforestasi — deteksi perubahan tutupan hutan (2001–2025)	https://deforestasi.badarmubarok.id
8	Deteksi Area Terbakar — pemetaan tingkat keparahan area terbakar (NBR/dNBR)	https://kebakaran.badarmubarok.id
9	Mata Elang — platform deteksi konservasi berbasis AI	https://mataelang.badarmubarok.id
10	SIM Konflik — Sistem Informasi Manajemen Konflik	https://simkonflik.badarmubarok.id
11	Seri Buku GIS Kehutanan dan Pertanian — 12 buku praktik GIS (dalam bahasa Indonesia)	https://badarmubarok.id/buku-gis/

INTERMEDIATE CLASS • SERI I2

ANALISIS RASTER DAN PENGINDRAAN JAUH DASAR

Aljabar raster, turunan DEM, klasifikasi terbimbing dan tak terbimbing, serta uji akurasi (kehutanan dan pertanian).

Yang akan Anda pelajari

- 1** Berhitung dengan Piksel: Aljabar Raster
- 2** Membaca Bentuk Bumi: Kemiringan, Arah Lereng, dan Bayangan Bukit
- 3** Dari Angka ke Kelas: Reklasifikasi dan Luas per Petak
- 4** Biarkan Citra yang Bicara: Klasifikasi Tak Terbimbing
- 5** Ajari Citra Mengenal Lahan: Klasifikasi Terbimbing
- 6** Seberapa Benar Peta Ini? Uji Akurasi



**Pindai untuk membuka
seluruh seri buku GIS**

Buku PDF, paket data, dan skrip
<https://badarmubarok.id/buku-gis/>