

DERET WAKTU & PEMODELAN

MASTER CLASS | SERI M3 | KEHUTANAN & PERTANIAN



DAFTAR ISI

Pendahuluan: Dari Satu Foto ke Film Panjang	1
Prasyarat	1
Cara membaca buku ini	1
Cerita berlanjut: KPH Contoh	2
Data latihan: paket-m3	2
Perangkat	2
Menyiapkan folder kerja	2
Hubungan ke seri lain	3
Hak cipta dan penggunaan	3
Unduhan: buku dan paket data	3
BAB 1: Dari Foto ke Film: Menyusun Deret Waktu	5
Studi kasus: "Apa yang terjadi sejak tahun lalu?"	5
Konsep: deret waktu dalam tiga kalimat	5
Mengetahui data yang dipakai	6
Menggabungkan Sentinel dan Landsat	6
Bagian A: Menyusun deret waktu di QGIS	8
Bagian B: ArcGIS Pro	10
Bagian C: ArcMap 10.8	10
BAB 2: Menyingkirkan Awan: Mask, Komposit, dan Menambal Lubang	13
Studi kasus: "Kenapa hutan kita tiba-tiba nol?"	13
Konsep: membersihkan awan dalam tiga kalimat	13
Mengapa tidak cukup memakai SCL saja	14
Bagian A: Membersihkan awan di QGIS	15
Bagian B: ArcGIS Pro	17
Bagian C: ArcMap 10.8	17
BAB 3: Membaca Irama Alam: Musim, Tren, dan Anomali	20
Studi kasus: "Mana yang memang begitu, mana yang berubah?"	20
Konsep: irama dalam tiga kalimat	20
Peringatan tentang "biasa"	20
Bagian A: Menghitung metrik deret waktu di QGIS	22
Bagian B: ArcGIS Pro	24
Bagian C: ArcMap 10.8	24
BAB 4: Menangkap Hutan yang Hilang: Deteksi Deforestasi	26
Studi kasus: "Ada laporan pembukaan di Gamma"	26
Konsep: deteksi perubahan dalam tiga kalimat	26
Bagian A: Deteksi deforestasi di QGIS	27
Cara 1: dua waktu (Skrip 4.1)	27
Cara 2: titik patah (Skrip 4.2)	28
Bagian B: ArcGIS Pro	30
Bagian C: ArcMap 10.8	30
BAB 5: Jejak Api: Bekas Kebakaran, NBR, dan Titik Panas	32
Studi kasus: "Titik panas bilang terbakar. Benarkah?"	32
Konsep: mengenali bekas bakar dalam tiga kalimat	32

Mengapa NBR, bukan NDVI saja?.....	32
Bagian A: Memetakan bekas bakar di QGIS.....	34
Bagian B: ArcGIS Pro.....	36
Bagian C: ArcMap 10.8.....	37
BAB 6: Mesin yang Belajar: Hutan Acak pada Deret Waktu.....	39
Studi kasus: "Satu peta untuk semua kejadian".....	39
Konsep: hutan acak dalam tiga kalimat.....	39
Di mana bedanya dengan M1 Bab 5?.....	40
Menyusun fitur dari deret waktu.....	40
Bagian A: Hutan acak di QGIS.....	41
Bagian B: ArcGIS Pro.....	43
Bagian C: ArcMap 10.8.....	44
BAB 7: Seberapa Percaya Peta Ini? Validasi dan Koreksi Luas.....	46
Studi kasus: "Angka ini boleh masuk laporan?".....	46
Konsep: validasi dalam tiga kalimat.....	46
Dua jenis kesalahan, dua sisi.....	47
Bagian A: Validasi di QGIS (Skrip 7.1).....	48
Bagian B: ArcGIS Pro.....	50
Bagian C: ArcMap 10.8.....	50
Penutup seri: ceklis kesiapan menuju M4.....	52
Lanjut belajar.....	52
Glosarium.....	53
Daftar Pustaka.....	57
Dokumentasi resmi.....	57
Makalah dan buku.....	58
Aplikasi Live Penulis.....	59

Pendahuluan: Dari Satu Foto ke Film Panjang

Buku ini adalah **Seri M3** dari kelas Master. Judulnya **Deret Waktu dan Pemodelan**. Sampai di sini, Anda sudah terbiasa memotret hutan dari angkasa. Sekarang Anda akan belajar **memutar filmnya**.

Satu citra satelit hanya menjawab "seperti apa hutan hari itu". Puluhan citra yang ditumpuk menurut tanggal menjawab pertanyaan yang lebih penting: **apa yang berubah, kapan, dan seberapa luas**. Itulah inti pemantauan hutan dan lahan.

Setelah selesai, Anda bisa:

- menyusun dan membersihkan deret waktu citra, termasuk membuang awan;
- membaca pola musim dan tren sebuah petak;
- mendeteksi deforestasi dan bekas kebakaran, lengkap dengan perkiraan tanggalnya;
- melatih model machine learning pada deret waktu;
- mengukur seberapa layak dipercaya sebuah peta, dan memperbaiki angka luasnya.

Prasyarat

Buku ini melanjutkan **Masterclass GIS Modern (M1)**. Anda perlu paham hal-hal berikut dari M1 dan seri sebelumnya.

- Citra dari katalog STAC dan format COG (M1 Bab 1). Buku ini **tidak mengulang** cara mengunduhnya.
- Sistem koordinat UTM, band, dan NDVI.
- Raster calculator, serta menjalankan alat Processing dari Python Console.
- Gagasan klasifikasi dan zonal statistics (M1 Bab 5). Di sana Anda memakai segmentasi objek dan Random Forest lewat OTB. Di sini Anda bekerja **per piksel dan per waktu**.

Bila Anda belum membaca M1: Anda masih bisa mengikuti buku ini selama sudah nyaman membuka raster, menghitung NDVI, dan menjalankan skrip Python di QGIS. Bagian yang menyinggung M1 selalu menyebut babnya.

Cara membaca buku ini

Tiap bab berpola sama:

- **Studi kasus:** masalah dari "KPH Contoh", kantor pengelola hutan fiktif.
- **Konsep:** inti gagasan dalam tiga kalimat, dengan analogi.
- **Langkah:** **Bagian A** untuk QGIS (acuan utama, paling lengkap). **Bagian B** untuk ArcGIS Pro. **Bagian C** untuk ArcMap 10.8, bila ada padanan.
- **Cek paham, Kesalahan umum, Ringkasan dan latihan, dan Tabel perbandingan.**

Bila sebuah fitur tidak ada di suatu perangkat, buku ini menyebutnya terus terang. Tanda **[CEK]** berarti langkah itu perlu Anda cocokkan dengan perangkat Anda sebelum dipakai.

Cerita berlanjut: KPH Contoh

Cerita masih terjadi di **KPH Contoh** dengan tiga petak: **KPH Alpha**, **KPH Beta**, dan **KPH Gamma**. Semua nama, tempat, dan peristiwa fiktif. Tokohnya hanya dikenal lewat peran: **Analisis Muda** (itu Anda) dan **Kepala Seksi**.

Di kelas Basic dan Intermediate, Anda menyiapkan peta dan mengotomatiskan analisis. Di kelas Master, tugasnya berubah: **memantau**. Kepala Seksi tidak lagi bertanya "di mana batasnya", melainkan "apa yang terjadi sejak tahun lalu".

Data latihan: paket-m3

Seluruh data di buku ini **sintetis**: dibuat oleh skrip penulis, bukan data lapangan. Hasil analisis dari data ini **bukan** kondisi hutan sebenarnya.

- **24 citra** bertanggal, dari 5 Januari 2024 sampai 25 Desember 2025, berjarak sekitar satu bulan.
- Tiap citra berukuran 40 x 40 piksel dengan piksel 10 m, menutup area 400 m x 400 m yang sama dengan paket data M1 (EPSG:32749). Ukuran piksel ini meniru Sentinel-2. Ini **bukan** data Sentinel-2 asli.
- Tiap tanggal punya dua berkas: `S2_YYYYMMDD_refl.tif` (enam band reflektansi: B02, B03, B04, B08, B11, B12) dan `S2_YYYYMMDD_SCL.tif` (peta kelas awan, bayangan, vegetasi, dan air).
- Di dalam data tersembunyi sebuah cerita: dua bukaan hutan, satu panen hutan tanaman yang terencana, dua kebakaran, sawah yang musiman, dan awan di mana-mana.
- Folder `acuan` berisi kunci jawaban untuk menguji hasil Anda. Folder `vektor` berisi `Kawasan_HTI.gpkg`, `Hotspot_Bertanggal.gpkg`, dan `Titik_Latih.gpkg`.

Skrip pembuatnya, `buat_deret_waktu.py`, ikut disertakan sehingga data bisa dibuat ulang.

Perangkat

- **QGIS 4.x**. Skrip buku ini diuji di QGIS 4.0.2 dengan data sintetis.
- Skrip memakai NumPy dan GDAL yang sudah ada di dalam QGIS. **scikit-learn tidak diperlukan**, tetapi dipakai bila terpasang.
- **ArcGIS Pro** dan **ArcMap 10.8**: bagian B dan C. Banyak alat deret waktu Pro memerlukan ekstensi **Image Analyst**.

Menyiapkan folder kerja

Salin folder `paket-m3` dan folder `skrip` ke komputer Anda, misalnya:

STRUKTUR FOLDER

```
D:/Latihan_M3/
paket-m3/      (data sintetis: citra, acuan, vektor)
skrip/         (m3_umum.py, hutan_mini.py, dan skrip bab)
hasil/        (dibuat otomatis oleh skrip)
```

Buka `m3_umum.py`, lalu cocokkan dua baris `PAKET` dan `HASIL` dengan lokasi folder Anda. Semua skrip lain memakai dua baris itu. Di QGIS, tambahkan folder `skrip` ke jalur Python dengan baris berikut di Python Console.

PYTHON

```
import sys
sys.path.append("D:/Latihan_M3/skrip")
```

Catatan tentang ilustrasi: Gambar di buku ini adalah **skema buatan penulis**, sebagian digambar dari data sintetis di atas. Bukan tangkapan layar. Letak tombol di komputer Anda bisa sedikit berbeda. Ikuti nama menu yang tertulis.

Hubungan ke seri lain

- **Sebelum:** M1 (citra cloud, drone, LiDAR, OBIA dan machine learning, atlas), serta kelas Basic dan Intermediate.
- **Sesudah:** M4 (pengembangan dan publikasi): hasil pemantauan di buku ini bisa Anda bungkus menjadi alat, layanan web, dan dasbor.

Kontak penulis: badarmubarok@gmail.com.

Hak cipta dan penggunaan

Hak cipta © 2026 Badar Mubarok 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 badarmubarok@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 M3	https://badarmubarok.id/buku-gis/m3/unduhan.html	semua berkas seri ini
Buku (PDF)	https://badarmubarok.id/buku-gis/m3/unduhan/BUKU-M3.pdf	buku ini dalam PDF
Paket data latihan	https://badarmubarok.id/buku-gis/m3/unduhan/data-sintetis-m3.zip	data sintetis latihan
Skrip (zip)	https://badarmubarok.id/buku-gis/m3/unduhan/skrip-m3.zip	skrip Python dan lainnya
Seluruh seri	https://badarmubarok.id/buku-gis/	12 buku Basic sampai Master

Pindai kode QR ini dengan kamera ponsel untuk membuka halaman unduhan M3.



BAB 1: Dari Foto ke Film: Menyusun Deret Waktu

Studi kasus: "Apa yang terjadi sejak tahun lalu?"

Kepala Seksi menaruh dua puluh empat berkas citra di meja Anda. "Ini rekaman dua tahun KPH Contoh. Saya mau tahu apa yang berubah. Tapi jangan kirim dua puluh empat peta. Kirim satu cerita." Tugas pertama Anda adalah mengubah tumpukan berkas itu menjadi satu deret waktu yang tertata, bertanggal, dan siap dianalisis.

Konsep: deret waktu dalam tiga kalimat

Deret waktu adalah kumpulan citra dari lokasi yang sama yang diambil pada tanggal berbeda, seperti **buku lipat bergambar**: tiap lembar hampir sama, dan perbedaan antar lembar menunjukkan gerakan. Bila lembar-lembar itu ditumpuk, tiap piksel punya **riwayat angka**, yang disebut **profil waktu**. Riwayat itu bisa dibaca seperti detak jantung: normal, naik turun musiman, atau tiba-tiba jatuh.

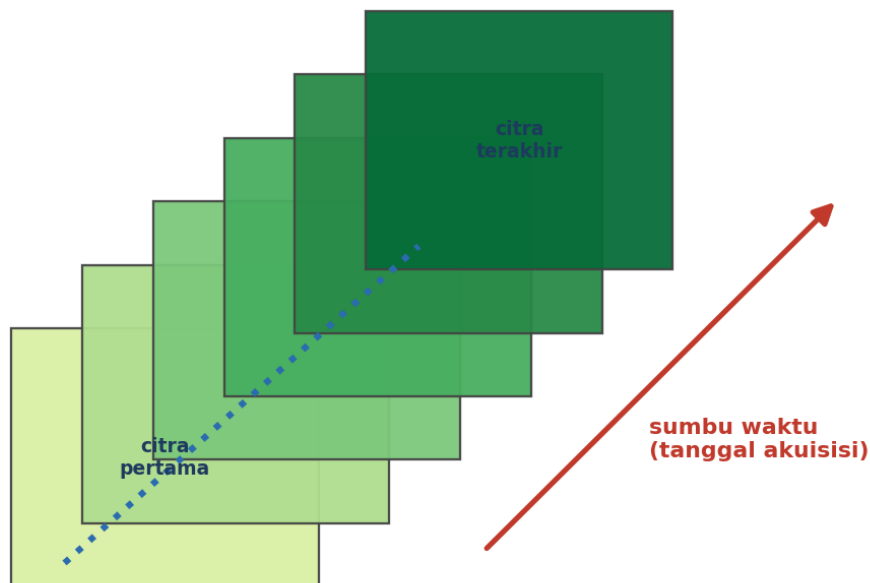
Istilah baru bab ini:

- **Deret waktu**: citra lokasi sama pada banyak tanggal.
- **Tumpukan (stack)**: semua tanggal digabung menjadi satu berkas, satu tanggal satu band.
- **Profil waktu**: nilai satu piksel sepanjang tanggal.
- **Stempel waktu**: tanggal yang menempel pada citra atau band.
- **Reflektansi**: pantulan permukaan, angka 0 sampai 1 (data sintetis di sini sudah berbentuk ini).

Ilustrasi 1.1: Kubus data

Satu piksel, banyak tanggal = satu profil waktu

24 citra ditumpuk menjadi satu kubus: x, y, dan waktu



Skema; bukan tangkapan layar

Mengenal data yang dipakai

Buka paket-m3/citra/Daftar_Citra.csv. Tabel ini adalah **buku harian** deret Anda. Isinya empat kolom: tanggal, berkas reflektansi, berkas SCL, dan persentase piksel yang tertutup awan.

Tiga hal yang perlu Anda sadari sejak awal:

- Selang antar tanggal **tidak sama**: ada yang 30 hari, ada yang 35 hari. Karena itu waktu harus dihitung dalam **hari**, bukan nomor urut.
- Persentase awan berkisar dari 0 sampai sekitar 60 persen. Awan itu akan Anda bereskan di Bab 2.
- Tiap berkas `_refl.tif` punya enam band dengan urutan tetap: B02, B03, B04, B08, B11, B12. Dalam ekspresi QGIS, B04 (merah) adalah band 3 dan B08 (inframerah dekat) adalah band 4.

Data asli berbeda sedikit: Data Sentinel-2 L2A asli biasanya berupa bilangan bulat berskala 10.000 dan bisa memakai offset tertentu. Periksa metadata produk Anda sebelum menghitung indeks. [CEK: aturan skala dan offset tiap versi produk]

Menggabungkan Sentinel dan Landsat

Bila satu sensor belum cukup rapat, orang menggabungkan Sentinel-2 dan Landsat. Syaratnya: samakan dulu "bahasa"-nya.

- **Nama band berbeda.** Contoh: inframerah dekat adalah B08 di Sentinel-2, dan band 5 di Landsat 8 dan 9. Periksa tabel band tiap sensor sebelum menghitung indeks. [CEK: cocokkan dengan dokumentasi sensor yang Anda pakai]
- **Skala berbeda.** Menurut USGS, reflektansi permukaan Landsat Collection 2 Level-2 dihitung dengan rumus: nilai piksel dikali 0,0000275, lalu dikurangi 0,2.
- **Resolusi berbeda.** Sentinel-2 10 m, Landsat 30 m. Samakan grid sebelum ditumpuk.

Buku ini memakai satu sensor tiruan supaya perhatian Anda tertuju pada cara kerja deret waktu, bukan pada urusan penyamaan sensor.

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Menyusun deret waktu di QGIS

A.1 Memuat dan memeriksa satu citra

1. Buka **Layer ► Data Source Manager** (Ctrl+L), pilih tab **Raster**, lalu tambahkan `S2_20240105_refl.tif`.
2. Klik kanan layer, pilih **Properties**, lalu buka tab **Information**. Pastikan: 6 band, ukuran 40 x 40, CRS EPSG:32749.
3. Buka tab **Symbology**. Pilih **Multiband color**, lalu atur Red = Band 4, Green = Band 3, Blue = Band 2. Itu komposit warna palsu sederhana. Hutan tampak merah.

Hasilnya: Anda mengenali isi satu tanggal. Sekarang tiap tanggal akan dijadikan NDVI.

A.2 Membuat NDVI tiap tanggal dan menumpuknya

Mengulang Raster Calculator dua puluh empat kali lewat klik itu membosankan. Pakai **Skrip 1.1**: ia membuat NDVI tiap tanggal, lalu menggabungkan semuanya menjadi satu berkas 24 band.

PYTHON

```
# SKRIP 1.1 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/1_1_susun_ndvi.py)
for tgl, pr, ps in daftar:
    nama = "S2_" + tgl.strftime("%Y%m%d") + "_refl"
    lyr = QgsRasterLayer(pr, nama)
    QgsProject.instance().addMapLayer(lyr, False)
    ekspresi = '("%s@4" - "%s@3") / ("%s@4" + "%s@3")' % (nama, nama, nama, nama)
    processing.run("native:rastercalc", {"LAYERS": [lyr], "EXPRESSION": ekspresi, "OUTPUT": out})
    keluaran.append(out)
# satu tanggal = satu band
processing.run("gdal:merge", {"INPUT": keluaran, "SEPARATE": True, "DATA_TYPE": 5, "OUTPUT": stack})
```

Cara membaca: `native:rastercalc` menghitung NDVI per tanggal. `gdal:merge` dengan `SEPARATE` bernilai benar menaruh tiap berkas pada band tersendiri. `DATA_TYPE` 5 berarti Float32.

Jalankan di **Plugins ► Python Console** (buka editor, muat berkas skrip, tekan Run). Hasil uji: berkas `NDVI_deret.tif` berisi 24 band dan terbaca valid di QGIS. [terbukti: diuji di QGIS 4.0.2]

Nama layer harus cocok dengan ekspresi: Di Raster Calculator, band dirujuk sebagai nama layer diikuti tanda at dan nomor band. Bila nama layer berubah, ekspresi gagal. Karena itu skrip memberi nama layer secara eksplisit.

A.3 Memberi stempel waktu pada tiap band

QGIS punya **Temporal Controller** untuk memutar layer menurut tanggal. Untuk berkas bertumpuk, pakai mode **Fixed Time Range Per Band**: tiap band memegang rentang tanggalnya sendiri. Menurut dokumentasi QGIS, mode ini memang dirancang untuk layer yang bandnya mewakili periode waktu berbeda.

Lewat antarmuka: klik kanan `NDVI_deret`, pilih **Properties**, buka tab **Temporal**, centang **Dynamic Temporal Control**, lalu pilih mode **Fixed Time Range Per Band** dan isi tanggal tiap band. Karena ada 24 band, pakai **Skrip 1.3**.

PYTHON

```
# SKRIP 1.3 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/1_3_atur_waktu.py)
rentang = {}
for b, (tgl, _, _) in enumerate(U.daftar_citra(), start=1):
    awal = QDateTime(QDate(tgl.year, tgl.month, tgl.day), QTime(0, 0, 0))
    rentang[b] = QgsDateTimeRange(awal, awal.addDays(1))
tp = lyr.temporalProperties()
tp.setMode(Qgis.RasterTemporalMode.FixedRangePerBand)
tp.setFixedRangePerBand(rentang)
tp.setIsActive(True)
```

Lalu buka panel dari **View ► Panels ► Temporal Controller Panel**, pilih mode **Animated temporal navigation**, atur rentang 2024-01-01 sampai 2025-12-31, dan tekan tombol putar. Hasil uji: skrip menandai 24 band bertanggal (band 9 = 16 September 2024). [terbukti: sifat temporal terbaca ulang; tampilan animasi di antarmuka perlu Anda lihat sendiri, [CEK]]

A.4 Membaca profil waktu satu piksel

Skrip 1.2 mengambil nilai NDVI satu titik di 24 band dengan `dataProvider().sample(titik, nomor_band)`, lalu menggambar grafiknya.

PYTHON

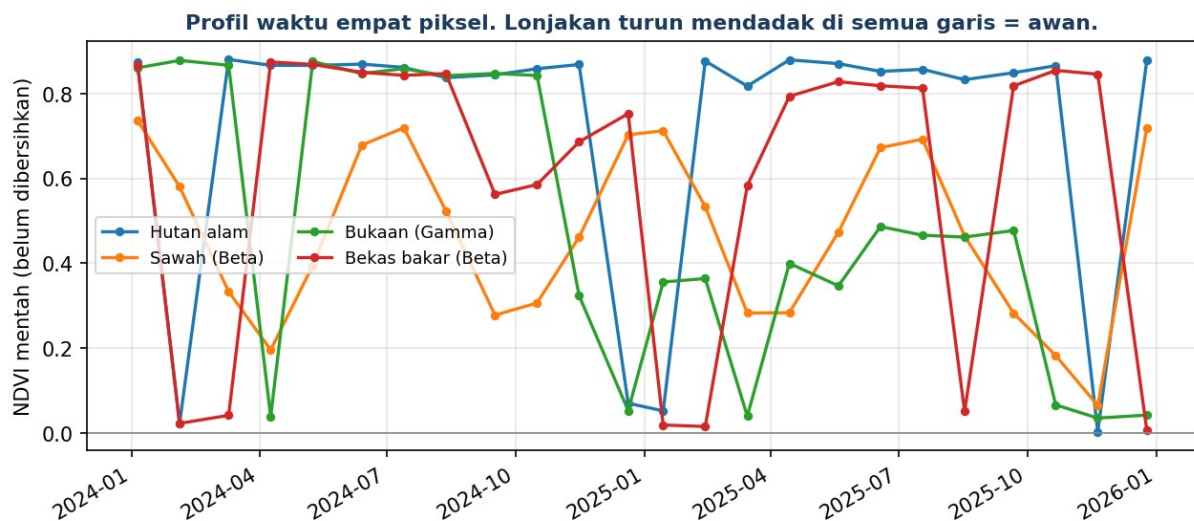
```
# SKRIP 1.2 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/1_2_profil_waktu.py)
dp = lyr.dataProvider()
for b in range(1, lyr.bandCount() + 1):
    v, ok = dp.sample(QgsPointXY(x, y), b)
    nilai.append(v if ok else np.nan)
```

Contoh hasil (NDVI **mentah**, belum dibersihkan):

Titik	NDVI tanggal pertama	NDVI minimum	NDVI tanggal terakhir
Hutan alam	0,87	0,00	0,88
Sawah (Beta)	0,74	0,06	0,72
Bukaan (Gamma)	0,86	0,03	0,04
Bekas bakar (Beta)	0,87	0,01	0,01

Perhatikan: hutan alam yang tidak berubah pun sempat "turun" ke 0,00. Itu bukan hutannya, melainkan **awan**. Masalah ini menjadi pokok Bab 2.

Ilustrasi 1.2: Profil waktu empat piksel



Skema; bukan tangkapan layar

Hasilnya: Anda punya satu berkas NDVI 24 band bertanggal dan tahu cara membaca riwayat satu piksel.

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

ArcGIS Pro menyebut tumpukan bertanggal sebagai **raster multidimensi**. Alat deret waktunya berada di ekstensi **Image Analyst**.

1. Buat **mosaic dataset** dari 24 berkas dengan **Create Mosaic Dataset** dan **Add Rasters To Mosaic Dataset**. [CEK]
2. Isi satu field tanggal pada tabel footprint untuk tiap berkas. Tanggal bisa diambil dari nama berkas `S2_YYYYMMDD`. [CEK]
3. Jalankan **Build Multidimensional Info** agar mosaic dataset mengenal dimensi waktu. Dokumentasi Esri menandai alat ini sebagai usang dan menyebut fungsinya dipindah ke toolbox **Multidimensional**. Cari padanannya di sana. [CEK]
4. Klik kanan layer di panel **Contents**, pilih **Create Chart**, lalu **Temporal Profile**. Klik titik di peta untuk melihat profil waktu. Dokumentasi Esri menyebut grafik ini tersedia untuk multidimensional mosaic dataset, multidimensional raster layer, dan netCDF raster layer, dan datanya harus punya dimensi waktu.

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

ArcMap **tidak** punya **raster multidimensi** dan **tidak** punya **grafik temporal profile** seperti Pro. [CEK: periksa di instalasi Anda]

1. Gabungkan tanggal lewat **mosaic dataset** dengan field tanggal, lalu atur properti waktunya agar bisa dimainkan lewat **Time Slider**. [CEK]
2. Untuk profil satu piksel, pakai **Extract Values to Points** pada tiap tanggal, lalu satukan tabelnya. [CEK]
3. Alternatif paling praktis: kerjakan bagian ini di QGIS, lalu bawa hasilnya ke ArcMap.

Cek paham

1. Mengapa waktu dalam deret ini dihitung dalam hari, bukan nomor urut citra?
2. Pada profil waktu, hutan yang tidak berubah sempat menunjukkan NDVI 0,00. Apa penyebab paling mungkin?
3. Apa gunanya mode Fixed Time Range Per Band?

Jawaban:

1. Selang antar tanggal tidak sama. Bila memakai nomor urut, kemiringan tren dan interpolasi menjadi keliru.
2. Awan atau bayangan awan yang menutupi piksel pada tanggal itu.
3. Memberi tanggal pada tiap band dalam satu berkas, sehingga Temporal Controller bisa menampilkan band yang sesuai tanggal.

Kesalahan umum

- **Menumpuk citra tanpa memeriksa urutan tanggal.** Urutan nama berkas harus sama dengan urutan tanggal. Di paket ini urutan abjad sama dengan urutan waktu karena nama berformat tahun-bulan-hari.
- **Lupa bahwa piksel berawan ikut tertumpuk.** Tumpukan mentah belum siap dianalisis.
- **Mencampur CRS atau ukuran piksel antar tanggal.** Semua tanggal harus satu grid. Periksa ukuran dan CRS tiap berkas sebelum `gdal:merge`.
- **Mengira Temporal Controller mengubah data.** Ia hanya mengatur apa yang tampil.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: deret waktu adalah tumpukan citra bertanggal. Tiap piksel punya profil waktu. Tanggal harus dihitung dalam hari. Tumpukan mentah masih tercemar awan.

Latihan:

1. Jalankan Skrip 1.1 dan 1.3, lalu putar animasi NDVI. Catat tanggal ketika petak di Gamma tampak "berlubang".
2. Ganti koordinat di Skrip 1.2 dengan titik pilihan Anda, misalnya di KPH Alpha. Bandingkan profilnya dengan hutan alam.
3. Dari `Daftar_Citra.csv`, tanggal mana yang paling bersih dan paling berawan?

Tabel perbandingan: menyusun deret waktu

Langkah	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8	Status
Tumpuk banyak tanggal	gdal:merge dengan SEPARATE	Mosaic dataset, raster multidimensi	Mosaic dataset berwaktu	QGIS terbukti; lainnya [CEK]
Stempel waktu	Fixed Time Range Per Band	Dimensi waktu pada mosaic	Properti waktu mosaic	QGIS: sifat terbukti
Putar animasi	Temporal Controller	Time slider pada layer multidimensi	Time Slider	[CEK]
Profil waktu satu titik	dataProvider().sample()	Create Chart, Temporal Profile	Tidak ada padanan langsung	QGIS terbukti; Pro: dokumentasi dibaca

BAB 2: Menyingkirkan Awan: Mask, Komposit, dan Menambal Lubang

Studi kasus: "Kenapa hutan kita tiba-tiba nol?"

Anda memperlihatkan grafik bab sebelumnya kepada Kepala Seksi. Ia mengernyit. "Hutan alam kok turun ke nol, lalu naik lagi? Hutannya bohong, atau datanya?" Datanya yang bohong. Awan dan bayangannya ikut terhitung sebagai permukaan. Sebelum menganalisis apa pun, Anda harus membersihkannya.

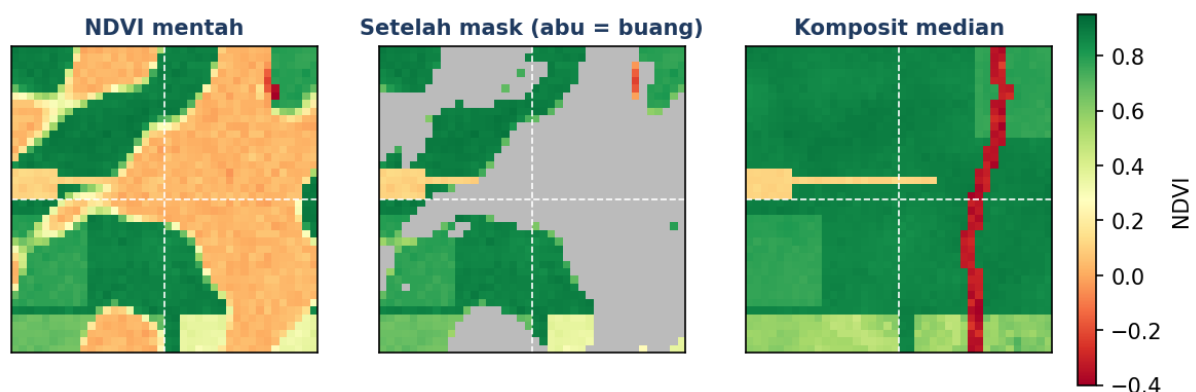
Konsep: membersihkan awan dalam tiga kalimat

Awan itu seperti **kaca buram di depan kamera**: apa pun yang tampak di baliknya bukan permukaan bumi. Cara membersihkannya ada tiga: **membuang** piksel buram memakai peta penanda (mask), **menggabungkan** banyak tanggal menjadi satu citra bersih (komposit), atau **menambal** lubangnya dari tanggal sebelum dan sesudah (interpolasi). Tiga cara itu bisa dipakai bersama.

Istilah baru bab ini:

- **SCL (Scene Classification Layer)**: band penanda kelas piksel pada produk Sentinel-2 L2A. Kodenya: 3 bayangan awan, 4 vegetasi, 5 bukan vegetasi, 6 air, 8 awan peluang sedang, 9 awan peluang tinggi, 10 cirrus tipis.
- **Mask**: peta penanda piksel yang dipakai atau dibuang.
- **Komposit median**: nilai tengah dari banyak tanggal; awan yang jarang muncul ikut tersisih.
- **Interpolasi linear temporal**: menarik garis lurus antara dua pengamatan bersih untuk mengisi tanggal yang hilang.
- **Pengamatan valid**: jumlah tanggal bersih pada sebuah piksel.

Ilustrasi 2.1: Awan, mask, dan komposit



Skema; bukan tangkapan layar

Mengapa tidak cukup memakai SCL saja

SCL adalah penebakan otomatis, bukan kebenaran. Di data latihan, tepi awan yang tipis sengaja dibuat lolos dari SCL, persis seperti di dunia nyata. Akibatnya masih ada sedikit "kabut" pada piksel yang dianggap bersih. Karena itu, **komposit median** lebih tahan banting daripada rata-rata: nilai ekstrem dari sisa kabut tidak ikut menarik hasil.

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Membersihkan awan di QGIS

A.1 Membuang awan tiap tanggal (Raster Calculator)

Idenya: piksel baik (SCL bernilai 4, 5, atau 6) dibiarkan, piksel buruk dijadikan NoData. Cara ringkasnya memakai kebiasaan Raster Calculator: pembagian dengan nol menghasilkan NoData. Jadi NDVI dibagi hasil ujian "piksel baik" (bernilai 1 bila baik, 0 bila buruk).

PYTHON

```
# SKRIP 2.1 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/2_1_masker_awan.py)
ekspresi = '"%s@1" / ("%s@1" = 4) OR ("%s@1" = 5) OR ("%s@1" = 6))' % (n_ndvi, n_scl, n_scl, n_scl)
processing.run("native:rastercalc", {"LAYERS": [l_ndvi, l_scl], "EXPRESSION": ekspresi, "OUTPUT": out})
```

Prasyarat: Skrip 1.1 sudah dijalankan. Hasil uji pada 24 tanggal: persentase piksel valid sama dengan 100 dikurangi persentase awan di `Daftar_Citra.csv`.

Tanggal	Piksel valid
5 Januari 2024	93,5%
10 Maret 2024	41,6%
13 Juni 2024	100,0%
25 Desember 2025	39,5%

Secara keseluruhan, **25,3%** piksel-tanggal tidak valid (awan, bayangan, atau cirrus). [terbukti: dihitung dari data sintetis]

Cara lain, hasil sama: Anda juga bisa memakai alat **Reclassify by table** pada SCL untuk membuat mask 1 dan 0. Pembagian di atas hanya cara tersingkat.

A.2 Komposit median dengan Cell Statistics

Alat **Cell statistics** (Processing Toolbox ► Raster analysis) menghitung satu nilai per piksel dari banyak layer. Pilih statistik **Median**, centang **Ignore NoData values**, dan pilih satu layer sebagai referensi grid.

PYTHON

```
# SKRIP 2.2 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/2_2_komposit_median.py)
processing.run("native:cellstatistics", {"INPUT": berkas[a:b], "STATISTIC": 3,
    "IGNORE_NODATA": True, "REFERENCE_LAYER": berkas[a], "OUTPUT_NODATA_VALUE": -9999, "OUTPUT": out})
```

STATISTIC 3 berarti median, dan 1 berarti Count (jumlah pengamatan valid). Skrip membuat tiga komposit:

Komposit	Tanggal	Pengamatan valid per piksel (minimum, rata-rata)	Piksel tanpa data
Sebelum	5 Jan sampai 12 Agu 2024 (8 tanggal)	3 dan 6,4	0
Kemarau 2024	13 Jun sampai 16 Sep 2024 (4 tanggal)	2 dan 3,6	0
Sesudah	21 Sep sampai 25 Des 2025 (4 tanggal)	1 dan 2,7	0

Perhatikan komposit **Sesudah**: ada piksel yang hanya punya **satu** pengamatan bersih. Median dari satu angka adalah angka itu sendiri, jadi komposit di sana sama rapuhnya dengan citra tunggal. **Selalu periksa peta jumlah pengamatan valid** sebelum memercayai komposit.

Median indeks atau indeks dari median?: Skrip ini menghitung median **NDVI**. Alternatifnya menghitung median tiap band lebih dulu, baru NDVI-nya. Kedua cara dipakai orang. Pilih satu dan konsisten antar periode.

A.3 Menambal lubang dengan interpolasi

Komposit menyatukan tanggal. Kadang Anda justru perlu **setiap tanggal tetap ada**, tanpa lubang. Untuk itu tarik garis lurus antara dua pengamatan bersih di sekitar lubang. QGIS tidak menyediakan alat siap pakai untuk ini pada tumpukan band, jadi **Skrip 2.3** memakainya lewat NumPy.

PYTHON

```
# SKRIP 2.3 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/2_3_isi_lubang.py)
hari = np.array([(t - tgl[0]).days for t in tgl], dtype="float64") # waktu dalam HARI
ok = baik[:, i, j]
hasil[:, i, j] = np.interp(hari, hari[ok], ndvi[ok, i, j])
```

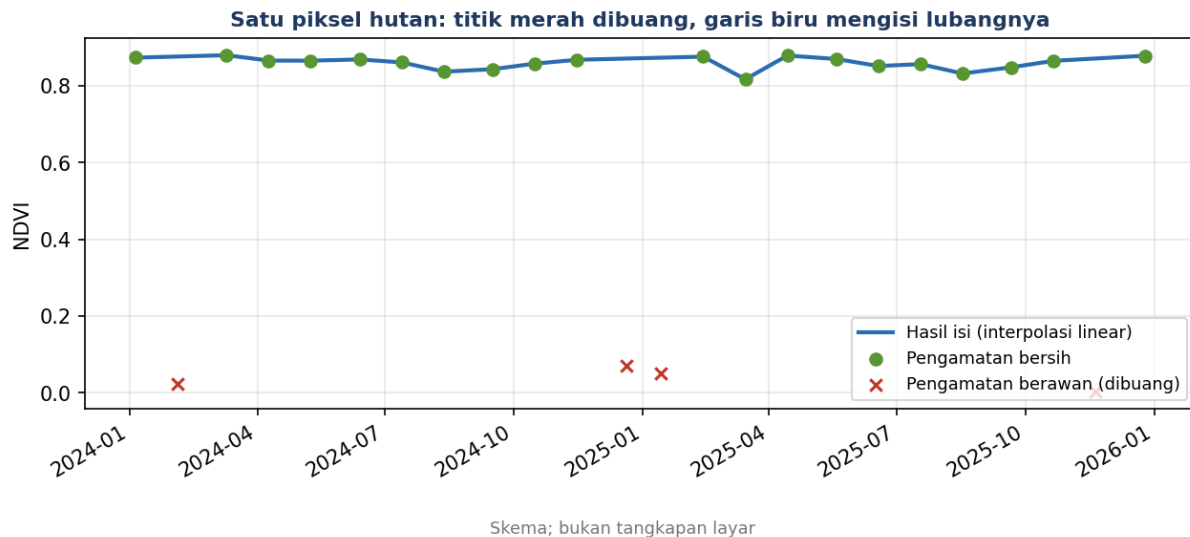
`np.interp` menarik garis lurus menurut hari. Di luar rentang pengamatan bersih, ia memakai nilai ujung (tidak menebak ke luar).

Uji sembunyi-isi. Cara menguji tambalan: sembunyikan sebagian pengamatan yang sebenarnya bersih, tambal, lalu bandingkan dengan nilai aslinya. Skrip 2.3 menyembunyikan 20% pengamatan bersih secara acak.

Kelas	Galat (RMSE) tambalan
Seluruh data (5.336 pengamatan)	0,078
Hutan alam	0,038
Hutan tanaman	0,039
Pertanian	0,158
Deforestasi	0,117

Galat median mutlak keseluruhan hanya 0,014, tetapi galat membesar di **sawah** (musim berganti cepat) dan di **bukaan** (nilai melompat mendadak). Garis lurus cocok untuk perubahan pelan, bukan untuk lompatan. [terbukti: dihitung dari data sintetis]

Ilustrasi 2.2: Mengisi lubang



Jangan menambal sebelum mendeteksi perubahan mendadak: Interpolasi menghaluskan lompatan. Pada deteksi deforestasi (Bab 4), pakai pengamatan bersih apa adanya, bukan hasil tambalan. Tambalan cocok untuk menghitung fitur musiman dan untuk machine learning (Bab 6).

Hasilnya: Anda punya mask per tanggal, tiga komposit, dan satu tumpukan NDVI tanpa lubang (NDVI_isi.tif).

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

1. **Mask:** pakai **Raster Calculator** atau tool **Con** (Spatial Analyst) dengan syarat SCL bernilai 4, 5, atau 6. [CEK]
2. **Komposit median:** pakai **Cell Statistics** (kelompok Spatial Analyst Tools, perlu ekstensi Spatial Analyst atau Image Analyst). Statistik yang tersedia: Majority, Maximum, Mean, Median, Minimum, Minority, Percentile, Range, Standard deviation, Sum, dan Variety. Parameter **Ignore NoData** aktif secara bawaan, sehingga piksel NoData dilewati.
3. **Menambal lubang:** pada raster multidimensi, Pro punya alat pengisian celah di toolbox **Multidimensional**. Cocokkan dengan versi Anda. [CEK] Alternatif: skrip ArcPy dengan NumPy, memakai logika yang sama dengan Skrip 2.3.

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

1. **Mask:** **Raster Calculator** atau **Con** (Spatial Analyst). [CEK]

2. **Komposit median: Cell Statistics**, statistik **MEDIAN**. Dokumentasi ArcMap menyebut dua mode NoData: **DATA** (NoData diabaikan) dan **NODATA** (satu NoData membuat hasil NoData). Pilih **DATA**. Perlu lisensi Spatial Analyst.
3. **Menambal lubang**: tidak ada alat siap pakai yang saya ketahui. Pakai skrip ArcPy dengan NumPy (Python 2.7). [CEK]

Cek paham

1. Mengapa komposit median lebih tahan terhadap awan sisa daripada rata-rata?
2. Komposit Sesudah punya piksel dengan satu pengamatan valid. Apa risikonya?
3. Mengapa tambalan linear kurang cocok untuk piksel yang baru dibuka (deforestasi)?

Jawaban:

1. Median tidak terpengaruh nilai ekstrem. Satu atau dua nilai berkabut tidak menggeser nilai tengah.
2. Hasilnya sama rapuhnya dengan citra tunggal. Bila satu pengamatan itu masih berkabut, hasilnya salah tanpa ada pembandingan.
3. Garis lurus menghaluskan lompatan. Pada piksel yang tiba-tiba terbuka, tambalan melandaikan perubahan yang sebenarnya mendadak.

Kesalahan umum

- **Mempercayai SCL sebagai kebenaran.** Tepi awan tipis bisa lolos. Pakai median, bukan rata-rata.
- **Memakai komposit tanpa memeriksa jumlah pengamatan valid.** Selalu buat dan lihat peta jumlah.
- **Menghitung selisih tanggal dalam nomor urut.** Pakai hari.
- **Menambal sebelum mendeteksi perubahan.** Tambalan menyamarkan kapan perubahan terjadi.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: buang piksel buruk memakai SCL, gabungkan tanggal dengan median, tambal lubang dengan interpolasi bila perlu, dan selalu cek jumlah pengamatan valid.

Latihan:

1. Buat komposit median untuk periode Jan sampai Mar 2024 saja. Berapa piksel yang pengamatan validnya kurang dari 3?
2. Ubah persentase yang disembunyikan di Skrip 2.3 dari 20% menjadi 40%. Bagaimana galatnya?
3. Bandingkan komposit median dengan komposit rata-rata (statistik Mean) pada periode yang sama. Di mana bedanya paling terlihat?

Tabel perbandingan: membersihkan awan

Langkah	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8	Status
Mask dari SCL	Raster Calculator	Raster Calculator, Con	Raster Calculator, Con	QGIS terbukti; lainnya [CEK]
Komposit median	Cell statistics (Median)	Cell Statistics (Median)	Cell Statistics (MEDIAN)	Pro dan ArcMap: dokumentasi dibaca
Abaikan NoData	Ignore NoData values	Ignore NoData	Mode DATA	Dokumentasi dibaca
Isi celah sepanjang waktu	Skrip NumPy	Alat Multidimensional [CEK] atau skrip	Skrip	QGIS terbukti

BAB 3: Membaca Irama Alam: Musim, Tren, dan Anomali

Studi kasus: "Mana yang memang begitu, mana yang berubah?"

Kepala Seksi menunjuk grafik sawah di Beta yang naik turun. "Ini rusak?" Anda menggeleng. Sawah memang naik turun: tanam, tumbuh, panen. Sebaliknya, hutan seharusnya hampir datar. Bila hutan ikut naik turun, itu patut dicurigai. Untuk membedakan "irama biasa" dari "perubahan sungguhan", Anda perlu mengenal irama tiap tutupan lahan.

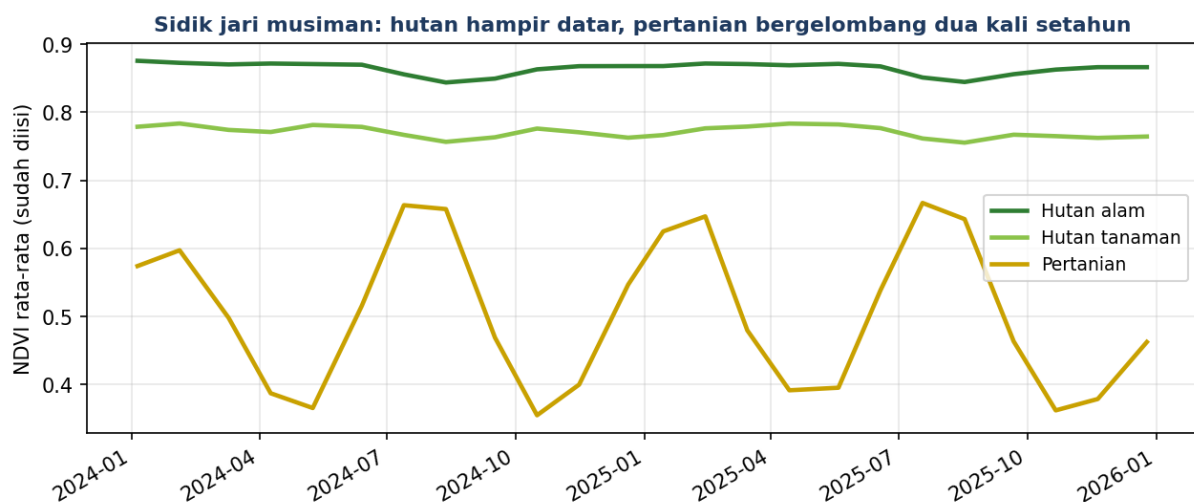
Konsep: irama dalam tiga kalimat

Tiap tutupan lahan punya **sidik jari musiman**, seperti detak jantung orang berbeda-beda: hutan berdetak tenang, sawah berdetak cepat dan tinggi. **Tren** adalah arah umum jangka panjang, naik atau turun, setelah irama musiman diabaikan. **Anomali** adalah selisih pada satu tanggal dari kondisi "biasanya", dan itulah tanda awal bahwa sesuatu tidak beres.

Istilah baru bab ini:

- **Fenologi**: pola musiman kehidupan tumbuhan (tumbuh, puncak, layu).
- **Amplitudo**: selisih nilai tertinggi dan terendah dalam deret.
- **Tren**: kemiringan garis lurus terhadap waktu.
- **Anomali**: selisih nilai satu tanggal dari nilai "biasa" piksel itu.
- **Metrik deret waktu**: angka ringkas dari satu deret (rata-rata, amplitudo, tren, dan sebagainya).

Ilustrasi 3.1: Sidik jari musiman



Skema; bukan tangkapan layar

Peringatan tentang "biasa"

Data latihan hanya dua tahun. Untuk menyebut sesuatu "biasa", pemantauan sungguhan memerlukan banyak tahun, agar variasi antar-tahun (misalnya tahun kering) ikut terhitung. Di bab ini, "biasa"

didefinisikan sederhana: **rata-rata piksel itu sendiri** sepanjang deret. Cukup untuk belajar, belum cukup untuk laporan resmi.

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Menghitung metrik deret waktu di QGIS

A.1 Metrik dengan alat bawaan

Alat **Cell statistics** bisa menghitung dari banyak layer: rata-rata, minimum, maksimum, simpangan baku, dan rentang (range). Ini cukup untuk amplitudo (statistik Range) dan ketidakstabilan (Standard deviation). Pada tumpukan satu berkas, pisahkan band ke layer terpisah lebih dulu, atau pakai berkas per tanggal dari Bab 2.

A.2 Tren dengan GRASS r.series

Untuk tren, alat **r.series** (Processing Toolbox ► GRASS ► Raster) punya metode **slope**: kemiringan garis lurus per piksel.

PYTHON

```
# Tren per piksel dengan GRASS (perlu penyedia GRASS aktif di QGIS)
processing.run("grass:r.series", {"input": berkas_ndvi_bersih, "-n": False, "method": 13, "output": out})
```

method 13 adalah slope. Lampirkan semua berkas NDVI **menurut urutan tanggal**. Hasil uji (lewat `qgis_process` di QGIS 4.0.2): cocok dengan hitungan NumPy pada pengamatan bersih, selisih terbesar sekitar 5 kali sepuluh pangkat minus sembilan. [terbukti]

Kemiringan r.series menurut nomor urut, bukan hari: r.series memperlakukan tanggal sebagai 1, 2, 3, dan seterusnya. Selang tanggal pada data latihan ini tidak sama (30 sampai 35 hari). Untuk tren yang jujur, hitung kemiringan terhadap **hari**. Itu yang dilakukan Skrip 3.1 di bawah.

A.3 Seluruh metrik sekaligus (Skrip 3.1)

PYTHON

```
# SKRIP 3.1 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/3_1_metrik_deret.py)
x, gt, prj = U.baca_tif(os.path.join(U.HASIL, "NDVI_isi.tif")) # 24 band tanpa lubang
rata, mini, maks = x.mean(0), x.min(0), x.max(0)
amplitudo = maks - mini
hc = hari - hari.mean() # waktu dalam hari
kemiringan = (hc[:, None, None] * (x - rata)).sum(0) / (hc ** 2).sum()
tren_tahun = kemiringan * 365.0 # perubahan NDVI per tahun
puncak = hari[x.argmax(0)] # hari saat NDVI tertinggi
anomali = x - rata[None] # tiap tanggal dikurangi rata-rata piksel
```

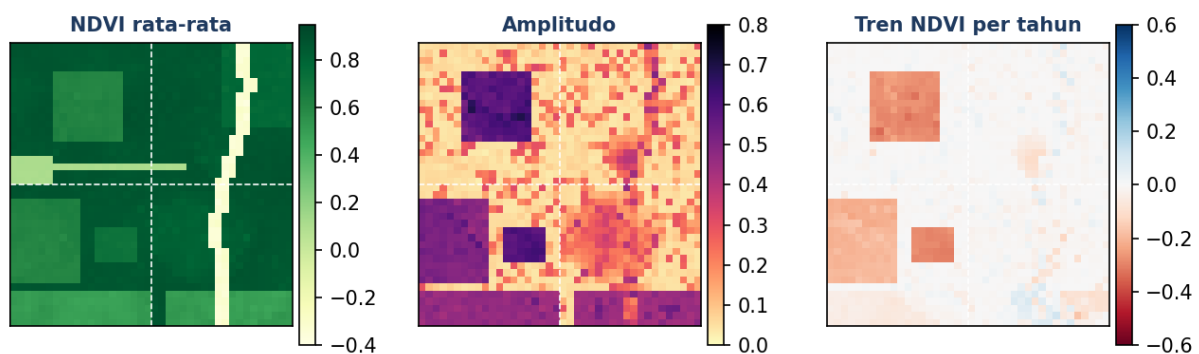
Skrip ini menghasilkan `metrik_ndvi.tif` (7 band) dan `anomali_ndvi.tif` (24 band). Rata-rata per kelas acuan:

Kelas	NDVI rata-rata	Amplitudo	Tren per tahun
Hutan alam	0,86	0,10	-0,004
Hutan tanaman	0,77	0,10	-0,006
Pertanian	0,50	0,46	-0,027
Terbuka	0,11	0,06	-0,001
Deforestasi	0,64	0,59	-0,281
Terbakar	0,82	0,23	-0,022
Panen hutan tanaman	0,61	0,51	-0,200

[terbukti: dihitung dari data sintetis]

Cara membacanya: hutan alam dan hutan tanaman punya amplitudo kecil dan tren nyaris nol, itulah "tenang". Pertanian beramplitudo besar tetapi trennya kecil: bergelombang, namun tidak ke mana-mana. **Deforestasi dan panen hutan tanaman** menonjol dengan tren sangat negatif.

Ilustrasi 3.2: Metrik pada peta



Skema; bukan tangkapan layar

Perhatikan sisi lain: deforestasi dan panen hutan tanaman sama-sama bertren negatif besar. Metrik tren saja **tidak bisa membedakan keduanya**. Perbedaan itu datang dari peta kawasan hutan tanaman (Bab 4).

A.4 Anomali sebagai alarm dini

Pada 16 September 2024, rata-rata anomali NDVI di bekas terbakar adalah **-0,115**, sedangkan di hutan stabil hanya **-0,015**. Anomali tanggal itu sudah menunjukkan petak mana yang aneh, bahkan sebelum Anda tahu penyebabnya. [terbukti: dihitung dari data sintetis]

Hasilnya: Anda punya sidik jari tiap piksel dan alarm anomali.

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

Pro punya alat khusus: **Generate Trend Raster** (kelompok Image Analyst Tools, perlu ekstensi Image Analyst).

1. Siapkan **raster multidimensi** (Cloud Raster Format, multidimensional mosaic dataset, atau raster dari netCDF, GRIB, atau HDF).
2. Jalankan **Generate Trend Raster**. Dimensi analisis: waktu.
3. Pilih jenis tren (**line_type**): LINEAR, POLYNOMIAL, HARMONIC, MANN-KENDALL, atau SEASONAL-KENDALL. Untuk deret musiman, jenis **HARMONIC** dan **SEASONAL-KENDALL** cocok. Untuk tren sederhana seperti di buku ini, pakai LINEAR.
4. Parameter keluaran opsional mencakup rmse, r2, dan slope_p_value. Hasilnya berupa raster multidimensi berformat CRF.

Dokumentasi Esri menyebut kelima jenis tren dan format CRF tersebut. Cocokkan dengan versi Anda. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

ArcMap **tidak punya padanan** untuk Generate Trend Raster maupun raster multidimensi.

1. Amplitudo dan simpangan baku: **Cell Statistics** dengan statistik **RANGE** dan **STD** pada banyak raster.
2. Tren: tidak ada alat siap pakai yang saya ketahui. Alternatif: hitung kemiringan dengan **Raster Calculator** memakai rumus kuadrat terkecil, atau pakai skrip ArcPy dengan NumPy. [CEK]

Cek paham

1. Mengapa pertanian beramplitudo besar bukan tanda masalah?
2. Mengapa tren saja tidak cukup untuk menyimpulkan deforestasi?
3. Apa kelemahan "biasa" yang dihitung dari dua tahun data?

Jawaban:

1. Amplitudo besar adalah sidik jari musiman sawah (tanam sampai panen). Masalah baru muncul bila iramanya menyimpang dari yang biasa.
2. Panen hutan tanaman yang terencana juga bertren sangat negatif. Perlu data pendukung seperti peta kawasan hutan tanaman.
3. Variasi antar-tahun belum terwakili. Tahun yang kebetulan kering bisa terbaca sebagai anomali padahal normal.

Kesalahan umum

- **Menghitung tren memakai nomor urut, bukan hari.** Kemiringannya menjadi miring sendiri bila selang tanggal tidak sama.
- **Menghitung tren pada deret mentah berawan.** Awan menjatuhkan nilai dan merusak kemiringan. Bersihkan atau tambal dulu.
- **Menafsirkan anomali sebagai bukti.** Anomali hanya alarm. Penyebabnya harus ditelusuri.
- **Mencampur kelas bertren berbeda dalam satu rata-rata.** Hitung per kelas.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: hutan tenang, sawah bergelombang, dan lahan yang berubah bertren tajam. Metrik ringkas (rata-rata, amplitudo, tren) dan anomali mengubah deret panjang menjadi angka yang mudah dibandingkan.

Latihan:

1. Jalankan Skrip 3.1. Buka `metrik_ndvi.tif` dan beri simbologi band 4 (amplitudo). Petak mana yang paling berirama?
2. Ubah Skrip 3.1 agar menghitung tren pada deret mentah tanpa tambalan. Bandingkan hasilnya.
3. Hitung band `hari_puncak` untuk sawah di Alpha dan di Beta. Apakah puncaknya bersamaan?

Tabel perbandingan: pola musim dan tren

Langkah	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8	Status
Amplitudo, simpangan baku	Cell statistics	Cell Statistics	Cell Statistics	Dokumentasi dibaca
Tren linear	GRASS r.series (slope) atau NumPy	Generate Trend Raster (LINEAR)	Tidak ada padanan	QGIS terbukti; Pro: dokumentasi
Tren musiman	NumPy (skrip sendiri)	HARMONIC, SEASONAL-KENDALL	Tidak ada padanan	Pro: dokumentasi
Anomali	Aljabar raster atau NumPy	Raster multidimensi [CEK]	Raster Calculator	QGIS terbukti

BAB 4: Menangkap Hutan yang Hilang: Deteksi Deforestasi

Studi kasus: "Ada laporan pembukaan di Gamma"

Sebuah laporan masuk: ada pembukaan hutan di KPH Gamma. Kepala Seksi minta tiga hal: **di mana**, **seberapa luas**, dan **kapan mulainya**. Ia juga berpesan, "Jangan campur dengan panen hutan tanaman. Itu tebangan terencana." Anda punya dua cara untuk menjawab: membandingkan dua potret, atau menonton seluruh film.

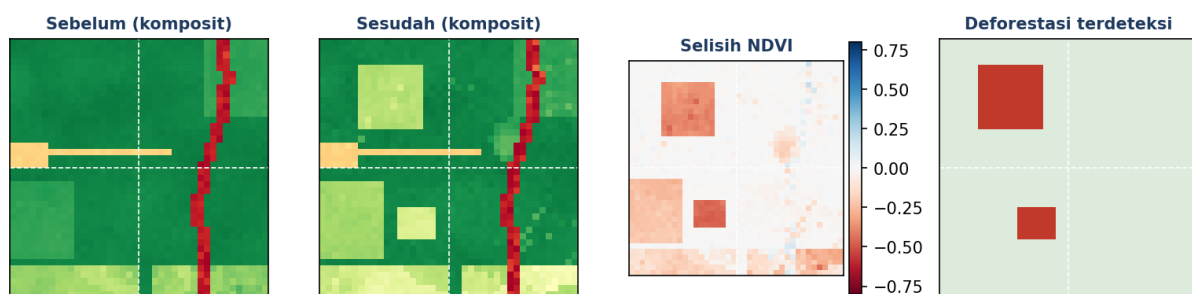
Konsep: deteksi perubahan dalam tiga kalimat

Deteksi perubahan dua waktu itu seperti permainan "temukan perbedaan" antara foto sebelum dan sesudah: cepat dan mudah, tetapi hanya tahu bahwa sesuatu berubah, bukan kapan. **Deteksi titik patah** menonton seluruh film piksel dan mencatat saat nilainya jatuh dan tidak kembali, sehingga bisa menyebut tanggal. Keduanya memerlukan aturan penolak awan dan aturan pembeda perubahan terencana.

Istilah baru bab ini:

- **Selisih (differencing)**: citra sesudah dikurangi citra sebelum.
- **Ambang (threshold)**: batas angka untuk menyebut sesuatu "berubah".
- **Luas minimum**: gumpalan lebih kecil dari ini dibuang sebagai derau.
- **Titik patah (break)**: saat deret berubah nilai secara menetap.
- **Pengamatan berturut-turut**: syarat bahwa jatuhnya nilai harus bertahan beberapa tanggal, supaya awan tidak menipu.

Ilustrasi 4.1: Dua waktu



Skema; bukan tangkapan layar

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Deteksi deforestasi di QGIS

Cara 1: dua waktu (Skrip 4.1)

Langkahnya, dengan komposit median dari Bab 2 sebagai bahan:

1. **Selisih:** $dNDVI = \text{komposit Sesudah} - \text{komposit Sebelum}$ dengan Raster Calculator.
2. **Ambang:** piksel yang tadinya berhutan (NDVI sebelum minimal 0,7) dan turun lebih dari 0,25.
3. **Saring derau:** alat **Sieve** (GDAL) membuang gumpalan lebih kecil dari 5 piksel (0,05 ha).
4. **Buang hutan tanaman:** ubah `Kawasan_HTI.gpkg` menjadi raster dengan **Rasterize**, lalu keluarkan area itu.
5. **Hitung luas** per KPH.

PYTHON

```
# SKRIP 4.1 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/4_1_deforestasi_dua_waktu.py)
processing.run("native:rastercalc", {"LAYERS": [sebelum, sesudah],
    "EXPRESSION": ' (("sebelum@1" >= 0.7) AND (("sesudah@1" - "sebelum@1") < -0.25)) * 1', "OUTPUT": kand})
processing.run("gdal:sieve", {"INPUT": kand, "THRESHOLD": 5, "EIGHT_CONNECTEDNESS": True,
    "NO_MASK": True, "OUTPUT": saring})
processing.run("gdal:rasterize", {"INPUT": hti_gpkg, "BURN": 1, "UNITS": 1, "WIDTH": 10, "HEIGHT": 10,
    "EXTENT": "312000,312400,9996000,9996400 [EPSG:32749]", "INIT": 0, "NODATA": 255, "DATA_TYPE": 0, "OUTPUT":
hti})
```

NoData pada hasil Rasterize: Bila peta kawasan hutan tanaman diberi nilai NoData 0, Raster Calculator akan membuang semua piksel di luar kawasan itu. Karena itu skrip memakai nilai awal 0 dan NoData 255.

Hasil uji terhadap peta acuan:

Ukuran	Nilai
Terdeteksi	130 piksel = 1,30 ha
Acuan	130 piksel = 1,30 ha
Presisi dan kepekaan	1,00 dan 1,00
KPH Gamma	1,00 ha terdeteksi, 1,00 ha acuan
KPH Alpha	0,30 ha terdeteksi, 0,30 ha acuan
KPH Beta	0,00 ha

[terbukti: dihitung dari data sintetis]

Hasil sempurna ini khas data sintetis: Nilai 1,00 muncul karena datanya bersih dan ambangnya dipilih dengan melihat jawabannya. Pada data nyata, jangan berharap sebersih ini. Bab 7 mengajarkan cara mengukur ketidakpastian yang jujur.

Uji kepekaan: ambang dan peta kawasan hutan tanaman

Berikut hitungan pada piksel (tepat, salah tambah, terlewat), **tanpa** saringan luas minimum.

Ambang selisih	Dengan peta hutan tanaman	Tanpa peta hutan tanaman
-0,15	130 / 13 / 0	130 / 133 / 0
-0,25	130 / 1 / 0	130 / 24 / 0
-0,35	118 / 1 / 12	118 / 1 / 12
-0,45	26 / 0 / 104	26 / 0 / 104

Pelajaran dari tabel: ambang terlalu longgar menangkap panen hutan tanaman dan derau (133 salah tambah). Ambang terlalu ketat melewatkan deforestasi, karena hutan yang dibuka sudah mulai ditumbuhi semak pada komposit akhir. Peta kawasan hutan tanaman memangkas salah tambah dari 24 menjadi 1 pada ambang -0,25. [terbukti]

Cara 2: titik patah (Scrip 4.2)

Cara dua waktu tidak bisa menyebutkan tanggal. Scrip 4.2 menonton tiap piksel:

1. **Dasar:** median enam pengamatan bersih pertama. Piksel yang dasarnya di bawah 0,7 (bukan hutan) dilewati.
2. **Aturan:** NDVI turun lebih dari 0,25 dari dasar pada **K** pengamatan bersih berturut-turut.
3. **Tanggal:** pengamatan pertama dalam rangkaian itu.

PYTHON

```
# SKRIP 4.2 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/4_2_titik_patah.py)
dasar = np.median(ndvi[idx[:N_DASAR], i, j])          # idx = tanggal bersih piksel ini
turun = ndvi[idx[N_DASAR:], i, j] < dasar - AMBANG
for n in range(len(turun) - K + 1):
    if turun[n:n + K].all():
        hasil[i, j] = idx[N_DASAR + n]                # tanggal awal perubahan
        break
```

Ilustrasi 4.2: Titik patah



Mengapa K dan mask awan penting. Tabel berikut menghitung piksel (tepat, salah tambah di luar kawasan hutan tanaman, terlewat) pada aturan yang sama.

K	Memakai mask SCL	Tepat	Salah tambah	Terlewat
1	tidak	128	873	2
2	tidak	128	593	2
3	tidak	128	156	2
1	ya	130	92	0
2	ya	130	8	0
3	ya	130	0	0

Tanpa mask awan, ratusan piksel salah ditandai. Dengan mask saja ($K=1$), masih ada 92 salah tambah: 48 piksel di **bekas terbakar** yang NDVI-nya sempat turun, dan 44 piksel hutan stabil yang tertipu kabut awan tipis lolos SCL. Dengan $K=2$, tersisa 8 piksel, semuanya bekas terbakar. Dengan $K=3$, semuanya hilang. Tetapi K besar punya harga: kejadian di akhir deret tidak bisa dipastikan karena belum cukup pengamatan sesudahnya. [terbukti]

Ketepatan tanggal. Tanggal sebenarnya diketahui karena data ini sintesis.

Bukaan	Tanggal sebenarnya	Terdeteksi paling awal	Rata-rata tunda
1 (Gamma, 100 piksel)	28 Okt 2024	15 Nov 2024	24 hari
2 (Alpha, 30 piksel)	5 Jun 2025	18 Jun 2025	13 hari

Tunda ini wajar: tanggal terdeteksi paling awal adalah **pengamatan bersih pertama sesudah kejadian**. Selisih tanggal sebenarnya dengan citra tidak bisa lebih rapat dari jarak antar-citra. Pada bukaan 1, sebagian piksel baru terdeteksi sampai 14 Januari 2025 karena awan menutupi citra bersih pertama. Laporkan tanggal sebagai **rentang** ("antara 16 Oktober dan 15 November 2024"), bukan satu hari. [terbukti]

Hasilnya: Anda bisa menjawab Kepala Seksi. **Di mana:** bukaan 1 di utara Gamma dan bukaan 2 kecil di Alpha. **Luas:** 1,30 ha total (1,00 ha Gamma, 0,30 ha Alpha). **Kapan:** antara 16 Oktober dan 15 November 2024 untuk bukaan 1, dan antara 19 Mei dan 18 Juni 2025 untuk bukaan 2.

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

1. **Dua waktu:** hitung selisih dan ambang dengan **Raster Calculator** atau **Minus** dan **Con**. Hapus gumpalan kecil dengan **Region Group** dan seleksi luas, atau dengan **Majority Filter**. [CEK]
2. **Titik patah:** Pro punya **Analyze Changes Using CCDC** (Image Analyst Tools, perlu ekstensi Image Analyst). Alat ini memakai algoritma Continuous Change Detection and Classification pada raster multidimensi. Menurut dokumentasi Esri, masukannya minimal 12 irisan yang mencakup setidaknya satu tahun, sebaiknya sudah ternormalisasi dan bebas awan. Hasilnya CRF berisi koefisien model, RMSE, dan perubahan teramati.
3. Alat pendampingnya, **Detect Change Using Change Analysis Raster**, mengolah hasil CCDC menjadi informasi perubahan per piksel.
4. Data latihan ini (24 irisan, dua tahun) memenuhi syarat jumlah. Cocokkan dengan versi Anda. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

ArcMap **tidak punya padanan** untuk deteksi titik patah (CCDC).

1. **Dua waktu:** **Raster Calculator** untuk selisih, **Con** untuk ambang, lalu **Region Group** atau **Majority Filter** untuk menyaring derau. [CEK]
2. **Titik patah:** tulis skrip ArcPy dengan NumPy, mengikuti Skrip 4.2. [CEK]

Cek paham

1. Mengapa deteksi dua waktu tidak bisa menyebut tanggal perubahan?
2. Apa gunanya syarat K pengamatan berturut-turut?
3. Mengapa peta kawasan hutan tanaman diperlukan?

Jawaban:

1. Ia hanya membandingkan dua potret. Tanggal kejadian ada di antara keduanya, tanpa petunjuk kapan.
2. Awan yang lolos dari mask biasanya hanya menurunkan satu atau dua tanggal. Perubahan sungguhan bertahan. Syarat berturut-turut membedakan keduanya.
3. Panen hutan tanaman membuat NDVI turun sama dalamnya dengan deforestasi. Hanya data pendukung yang bisa membedakan penebangan terencana dari pembukaan.

Kesalahan umum

- **Memilih ambang setelah melihat jawaban.** Pakai data pelatihan atau wilayah contoh terpisah.
- **Memakai komposit akhir yang terlalu jauh dari kejadian.** Semak yang tumbuh kembali mengecilkan selisih.
- **Menyebut satu tanggal pasti.** Tanggal terdeteksi paling awal adalah pengamatan bersih pertama sesudah kejadian.
- **Mencampur deforestasi dengan perubahan terencana atau kebakaran.** Gunakan data pembeda (peta hutan tanaman, indeks inframerah gelombang pendek seperti Bab 5).

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: dua waktu cepat untuk luas, titik patah perlu untuk tanggal. Awan, hutan tanaman, dan kebakaran adalah tiga penyebab utama salah tambah. Aturan berturut-turut dan peta pendukung mengendalikannya.

Latihan:

1. Ubah AMBANG di Skrip 4.1 menjadi -0,30. Berapa ha yang terdeteksi? Mengapa berbeda dari -0,25?
2. Ubah K di Skrip 4.2 menjadi 2. Berapa piksel salah tambah muncul bila mask SCL dipakai?
3. Pilih satu piksel bukaan 2, lalu gambar profilnya. Kapan pengamatan bersih terakhir sebelum bukaan?

Tabel perbandingan: deteksi deforestasi

Langkah	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8	Status
Selisih dan ambang	Raster Calculator	Raster Calculator, Con	Raster Calculator, Con	QGIS terbukti; lainnya [CEK]
Buang gumpalan kecil	gdal:sieve	Region Group, Majority Filter [CEK]	Region Group, Majority Filter [CEK]	QGIS terbukti
Titik patah	Skrip NumPy	Analyze Changes Using CCDC	Tidak ada padanan	Pro: dokumentasi dibaca
Kawasan hutan tanaman sebagai mask	gdal:rasterize	Polygon to Raster [CEK]	Polygon to Raster [CEK]	QGIS terbukti

BAB 5: Jejak Api: Bekas Kebakaran, NBR, dan Titik Panas

Studi kasus: "Titik panas bilang terbakar. Benarkah?"

Pada musim kemarau, lembaga pemantau mengirim daftar **titik panas** di sekitar KPH Contoh. Kepala Seksi bertanya, "Dua belas titik. Berapa hektare yang benar-benar terbakar? Titik yang mana yang palsu?" Titik panas hanya mengatakan "ada panas di sekitar sini". Luas dan lokasi bekas bakar harus Anda ukur sendiri dari citra.

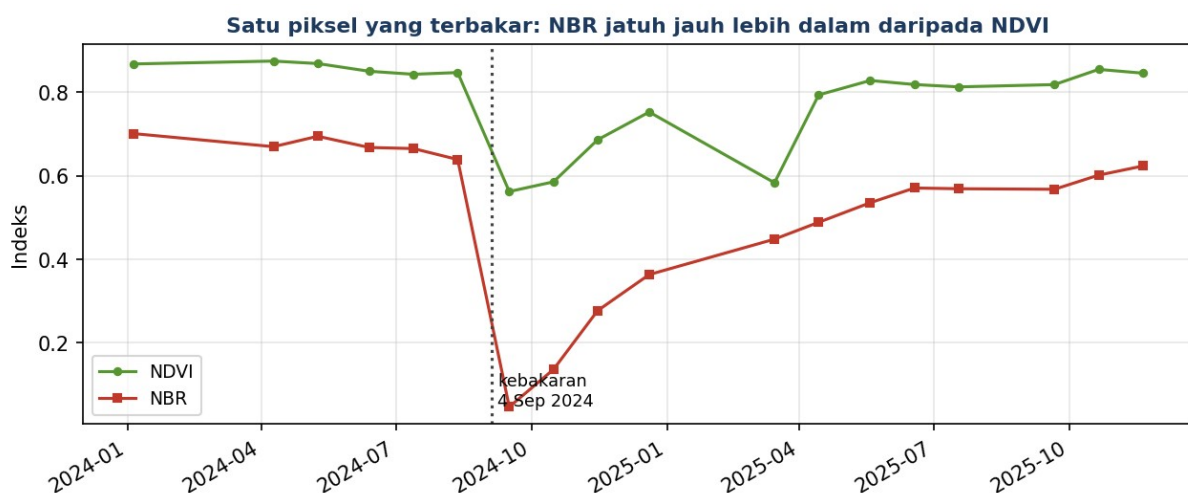
Konsep: mengenali bekas bakar dalam tiga kalimat

Tumbuhan sehat memantulkan banyak inframerah dekat (NIR) dan sedikit inframerah gelombang pendek (SWIR). Setelah terbakar, kebalikannya terjadi, seperti **arang yang menyerap cahaya hijau**: NIR anjlok dan SWIR naik. Indeks **NBR** menangkap pembalikan itu, dan selisihnya antara sebelum dan sesudah kebakaran (**dNBR**) menunjukkan seberapa parah terbakarnya.

Istilah baru bab ini:

- **SWIR**: inframerah gelombang pendek; di Sentinel-2 dipakai B11 dan B12.
- **NBR**: $(NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$. Untuk Sentinel-2: B08 dan B12.
- **dNBR**: NBR sebelum dikurangi NBR sesudah. Makin besar, makin parah.
- **Tingkat keparahan**: kelas dNBR dari ringan sampai berat.
- **Titik panas (hotspot)**: titik deteksi suhu tinggi oleh satelit; indikator api, bukan peta bekas bakar.

Ilustrasi 5.1: NDVI dan NBR pada piksel terbakar



Skema; bukan tangkapan layar

Mengapa NBR, bukan NDVI saja?

Pada piksel terbakar di grafik, NDVI hanya turun dari sekitar 0,87 ke sekitar 0,56. NBR turun dari sekitar 0,64 ke sekitar 0,05. NBR bergerak lebih dari dua kali lebih jauh, sehingga lebih mudah

dibedakan dari derau. Itu sebabnya Bab 4 dengan NDVI sempat tertipu oleh bekas bakar, sedangkan NBR langsung mengenalinya.

Angka kelas keparahan dari literatur: Kelas keparahan yang sering dikutip (Key dan Benson, dimuat dalam FIREMON, Dinas Kehutanan AS): di bawah 0,10 tidak terbakar atau tumbuh kembali, 0,10 sampai 0,27 ringan, 0,27 sampai 0,44 sedang-ringan, 0,44 sampai 0,66 sedang-berat, dan di atas 0,66 berat. Angka ini berasal dari hutan di wilayah lain dan **harus dikalibrasi** untuk hutan Anda. Di data sintetis, ambang terbaik berbeda.

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Memetakan bekas bakar di QGIS

A.1 NBR dan dNBR (Skrrip 5.1)

Rumus NBR dalam Raster Calculator untuk berkas `_refl.tif` adalah $(\text{band } 4 - \text{band } 6) / (\text{band } 4 + \text{band } 6)$. Band 4 adalah B08 dan band 6 adalah B12. Skrip membuat NBR bersih untuk 24 tanggal (dengan mask SCL seperti Bab 2), lalu:

1. **Komposit median sebelum** dan **sesudah** tiap kejadian. Kejadian 2024: sebelum 13 Jun sampai 12 Agu, sesudah 16 Sep sampai 16 Okt. Kejadian 2025: sebelum 18 Jun sampai 18 Jul, sesudah 17 Agu sampai 21 Sep.
2. **dNBR** = sebelum dikurangi sesudah.
3. **Batasi** pada hutan dan hutan tanaman menurut peta tutupan awal, dengan NBR sebelum minimal 0,5. Air dan sawah dibuang karena NBR mereka tidak stabil.
4. **Ambang dNBR**.

PYTHON

```
# SKRIP 5.1 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/5_1_dnbr.py)
ek = '(((R@s@4" - "R@s@6") / ("R@s@4" + "R@s@6")) / ((S@s@1" = 4) OR (S@s@1" = 5) OR (S@s@1" = 6)))' % ((k,)
* 7)
processing.run("native:rastercalc", {"LAYERS": [a, s], "EXPRESSION": ek, "OUTPUT": out})
processing.run("native:rastercalc", {"LAYERS": [la, lb], "EXPRESSION": '"pre@1" - "post@1"', "OUTPUT": d})
layak = (pre_n >= 0.5) & np.isin(awal, (1, 2))      # hanya hutan dan hutan tanaman
bakar = layak & (dn > AMBANG_BAKAR)
```

Air tampak "terbakar": NBR air kira-kira (0,015 dikurangi 0,005) dibagi 0,02, yaitu sekitar 0,5. Nilainya tinggi dan goyah, sehingga dNBR air sering besar. Tanpa pembatasan ke hutan, 18 piksel sungai dan 10 piksel sawah ikut ditandai terbakar pada ambang 0,10 di kejadian 2025.

Uji ambang (kejadian 2024 di KPH Beta; acuan 128 piksel = 1,28 ha):

Ambang dNBR	Terdeteksi (ha)	Tepat	Salah tambah	Terlewat	Presisi	Kepekaan
0,05	1,38	128	10	0	0,93	1,00
0,10	1,29	128	1	0	0,99	1,00
0,20	1,14	114	0	14	1,00	0,89
0,27	0,91	91	0	37	1,00	0,71
0,44	0,30	30	0	98	1,00	0,23

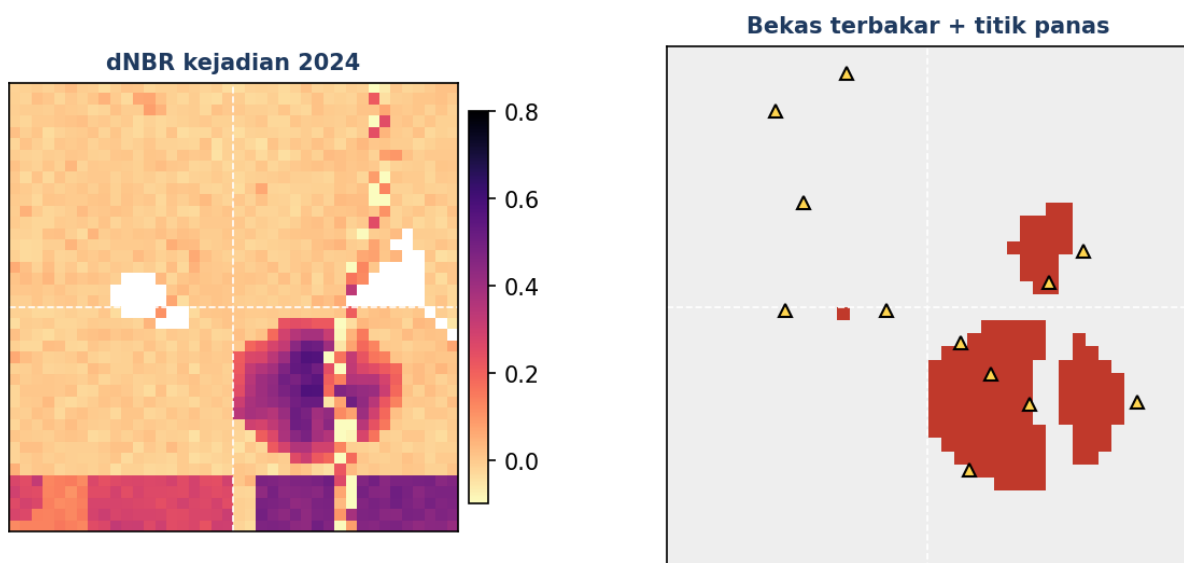
Pelajaran dari tabel: ambang literatur 0,27 melewati 37 piksel, yaitu tepi bakar yang ringan. Ambang 0,10 paling seimbang di data ini. **Ambang dari buku bukan hukum.** Kalibrasi dengan sampel lapangan atau citra resolusi tinggi. [terbukti: dihitung dari data sintesis]

Kejadian 2025 di KPH Gamma (acuan 23 piksel = 0,23 ha): pada ambang 0,10, semua 23 piksel terdeteksi tanpa salah tambah. Hasil per KPH dengan ambang 0,10:

KPH	Terbakar terdeteksi	Acuan
Alpha	0,01 ha	0,00 ha
Beta	1,28 ha	1,28 ha
Gamma	0,23 ha	0,23 ha

Satu piksel salah tambah di Alpha adalah derau. Seperti Bab 4, hasil sebersih ini khas data sintetis. [terbukti]

Ilustrasi 5.2: dNBR dan titik panas



Skema; bukan tangkapan layar

A.2 Mencocokkan titik panas (Skrrip 5.2)

Jadikan bekas terbakar poligon dengan **Polygonize** dan **Extract by location**.

PYTHON

```
# SKRIP 5.2 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/5_2_titik_panas.py)
processing.run("gdal:polygonize", {"INPUT": bakar, "BAND": 1, "FIELD": "DN", "OUTPUT": poli})
sumber = processing.run("native:buffer", {"INPUT": hs, "DISTANCE": 15, "SEGMENTS": 8, "OUTPUT":
"TEMPORARY_OUTPUT"})["OUTPUT"]
r = processing.run("native:extractbylocation", {"INPUT": sumber, "PREDICATE": [0], "INTERSECT": lp, "OUTPUT":
"TEMPORARY_OUTPUT"})["OUTPUT"]
```

Titik panas itu titik, sedangkan citra satelit pendeteksinya jauh lebih kasar dari piksel 10 m. Karena itu uji dengan **penyangga** (buffer) di sekeliling titik.

Penyangga	Titik panas di dalam bekas bakar (dari 12)
0 m	4 titik (HS-006, HS-009, HS-010, HS-011)
15 m	7 titik
30 m	8 titik

Empat titik sisa, yaitu HS-001, HS-003, HS-007, dan HS-008, tetap di luar bekas bakar. Dua di antaranya (HS-001 dan HS-007) jatuh di bukaan hutan Gamma pada akhir Oktober 2024, sesuai pembukaan lahan dengan api. Satu lainnya (HS-003) berada di hutan tanpa bekas apa pun. Dua titik di Alpha (HS-008 dan HS-012, Maret 2025) tidak berbekas di citra. HS-012 hanya "cocok" pada penyangga 30 m, karena kebetulan dekat satu piksel derau di Alpha. Penyebabnya bisa api kecil di bawah ukuran piksel, atau titik palsu. Penyelidikan lapangan yang memutuskan.

Perkiraan tanggal terbakar. Pengamatan bersih pertama dengan NBR turun lebih dari 0,2 dari dasar:

Perkiraan tanggal dari citra	Jumlah piksel
16 September 2024	122
16 Oktober 2024	2
17 Agustus 2025	23

Tiga titik panas di dalam bekas bakar 2024 bertanggal 4 September 2024, dan satu titik di bekas bakar 2025 bertanggal 12 Agustus 2025. Selisihnya dengan tanggal citra: 12 hari untuk kejadian 2024 dan 5 hari untuk 2025. Citra hanya bisa mengatakan "sebelum tanggal ini belum terbakar, sesudahnya sudah". Titik panas memberi tanggal yang lebih tepat. Gunakan keduanya saling melengkapi. [terbukti: dihitung dari data sintetis]

Hasilnya: Anda bisa menjawab Kepala Seksi. **Terbakar:** sekitar 1,5 ha (1,28 ha di Beta, 0,23 ha di Gamma). **Titik panas yang cocok:** 4 sampai 8 dari 12, tergantung toleransi jarak. **Sisanya:** perlu verifikasi lapangan.

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

1. **NBR dan dNBR: Raster Calculator** atau **Band Arithmetic** pada band NIR dan SWIR2. Pada Sentinel-2, itu B08 dan B12. [CEK]
2. **Komposit sebelum dan sesudah: Cell Statistics** (Median), lalu **Minus** untuk selisih.
3. **Kelas keparahan: Reclassify** (Spatial Analyst) dengan ambang pilihan Anda. [CEK]
4. **Poligon: Raster to Polygon.**
5. **Titik panas: Select Layer By Location** atau **Spatial Join** terhadap poligon bekas bakar. Untuk toleransi jarak, pakai opsi jarak pencarian atau **Buffer**. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

1. **NBR dan dNBR: Raster Calculator** dengan band NIR dan SWIR2 sensor Anda. [CEK]
2. **Komposit: Cell Statistics** (MEDIAN, Ignore NoData mode DATA).
3. **Kelas: Reclassify. Polygon: Raster to Polygon.** [CEK]
4. **Titik panas: Select By Location** dengan jarak pilihan. [CEK]

Cek paham

1. Mengapa NBR lebih peka terhadap bekas bakar daripada NDVI?
2. Mengapa ambang dNBR dari literatur tidak boleh dipakai begitu saja?
3. Mengapa titik panas diuji dengan penyangga, bukan hanya "di dalam atau di luar"?

Jawaban:

1. Setelah terbakar, NIR turun dan SWIR naik sekaligus. NBR memakai keduanya, sehingga geraknya lebih besar daripada NDVI.
2. Angka itu berasal dari ekosistem dan sensor lain. Di data ini, ambang 0,27 melewati 37 piksel tepi bakar.
3. Titik panas ditentukan dari data satelit kasar, posisinya tidak setajam piksel 10 m. Sedikit toleransi jarak adalah wajar.

Kesalahan umum

- **Memakai NDVI untuk kebakaran.** Penurunannya terlalu kecil dan bercampur dengan perubahan lain.
- **Tidak membatasi pada hutan.** Air dan sawah menghasilkan dNBR palsu.
- **Menyamakan titik panas dengan peta bekas bakar.** Titik hanya petunjuk, bukan batas.
- **Memakai jendela waktu terlalu lebar.** Pemulihan vegetasi mengecilkan dNBR. Pakai komposit dekat tanggal kejadian.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: NBR mengukur kebakaran dengan lebih peka daripada NDVI. dNBR menunjukkan keparahan, tetapi ambangnya harus dikalibrasi. Titik panas melengkapi, bukan menggantikan, peta bekas bakar.

Latihan:

1. Jalankan Skrip 5.1 dengan ambang 0,20. Berapa ha yang terdeteksi di Beta?
2. Buat kelas keparahan empat tingkat dari dNBR 2024 memakai **Reclassify by table**. Berapa ha tiap kelas?
3. Ulangi Skrip 5.2 dengan penyangga 50 m. Titik mana yang masih tertinggal?

Tabel perbandingan: kebakaran dan titik panas

Langkah	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8	Status
NBR dan dNBR	Raster Calculator	Raster Calculator, Band Arithmetic	Raster Calculator	QGIS terbukti; lainnya [CEK]
Komposit	Cell statistics	Cell Statistics	Cell Statistics	Dokumentasi dibaca
Kelas keparahan	Reclassify by table	Reclassify	Reclassify	[CEK]
Poligon bekas bakar	Polygonize	Raster to Polygon	Raster to Polygon	QGIS terbukti; lainnya [CEK]
Titik panas di dalam bekas bakar	Extract by location, Buffer	Select Layer By Location	Select By Location	QGIS terbukti; lainnya [CEK]

BAB 6: Mesin yang Belajar: Hutan Acak pada Deret Waktu

Studi kasus: "Satu peta untuk semua kejadian"

Bab 4 dan 5 menghasilkan peta deforestasi dan peta bekas bakar dengan aturan dan ambang buatan Anda. Kepala Seksi senang, lalu bertanya, "Bisakah satu peta langsung menyebut mana hutan stabil, hutan tanaman, sawah, bukaan, bekas bakar, dan panen? Tanpa aturan yang berbeda-beda tiap kasus." Inilah pekerjaan yang cocok untuk **machine learning**: Anda memberi contoh, mesin mencari aturannya.

Konsep: hutan acak dalam tiga kalimat

Pohon keputusan itu seperti permainan tebak-tebakan yang berisi pertanyaan bercabang ("NBR minimumnya di bawah 0,2? Ya, maka terbakar"). **Hutan acak** adalah ratusan pohon yang masing-masing belajar dari contoh dan fitur berbeda, lalu **memberi suara**, dan suara terbanyak menang. Hasilnya lebih stabil daripada satu pohon, seperti keputusan panitia yang lebih tepercaya daripada satu juri.

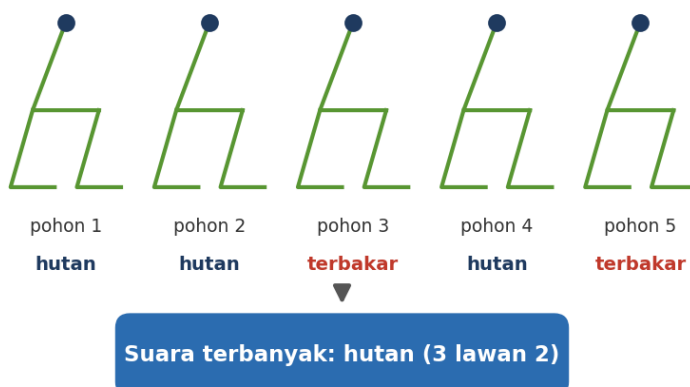
Istilah baru bab ini:

- **Fitur**: angka yang menjelaskan sebuah piksel (misalnya NDVI rata-rata, NBR minimum).
- **Sampel latih**: titik yang kelasnya sudah diketahui, dipakai untuk belajar.
- **Pohon keputusan**: aturan bercabang "jika... maka...".
- **Hutan acak (random forest)**: banyak pohon yang memberi suara.
- **Kepentingan fitur**: seberapa sering sebuah fitur dipakai untuk memisahkan kelas.

Ilustrasi 6.1: Hutan acak

Hutan acak = banyak pohon keputusan, tiap pohon melihat sampel dan fitur yang berbeda

Tiap pohon memberi satu suara; kelas dengan suara terbanyak menang



Skema; bukan tangkapan layar

Di mana bedanya dengan M1 Bab 5?

M1 Bab 5 membahas klasifikasi **berbasis objek** pada **satu citra komposit**: citra dipotong menjadi segmen, lalu segmen diklasifikasi dengan Random Forest lewat OTB. Di sini, Anda bekerja **per piksel**, dan fiturnya berasal dari **riwayat waktu**, bukan dari warna satu hari. Algoritmanya sama, bahannya berbeda. Kekuatan deret waktu: **kelas yang mirip pada satu hari sering berbeda dalam perilaku**, misalnya hutan stabil dan sawah yang sedang hijau.

Menyusun fitur dari deret waktu

Skrip 6.1 membuat 12 fitur per piksel dari NDVI, NBR, dan SWIR1 yang sudah ditambah (Bab 2):

Kelompok	Fitur
Kehijauan	rata-rata, minimum, maksimum, simpangan baku, tren per tahun
Perubahan	penurunan terbesar antar-tanggal, selisih 4 tanggal akhir dikurangi 4 tanggal awal
Kebakaran	NBR rata-rata, NBR minimum, penurunan NBR terbesar, selisih akhir dikurangi awal
Mineral dan kelembapan	SWIR1 rata-rata

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Hutan acak di QGIS

QGIS tidak memiliki alat Random Forest bawaan di Processing Toolbox. Ada tiga jalan.

- **OTB** (Orfeo Toolbox): seperti di M1 Bab 5. Dipasang terpisah.
- **scikit-learn** di Python QGIS: perlu dipasang ke Python QGIS. Di data latihan, skrip memakainya bila ada. [CEK: tidak terpasang di lingkungan uji]
- **hutan_mini.py**: hutan acak ringkas buatan penulis dengan NumPy saja. Tujuannya belajar dan menjalankan buku ini tanpa pemasangan tambahan. Ia meniru antarmuka scikit-learn: `fit`, `predict`, dan `feature_importances_`.

A.1 Membangun tumpukan fitur (Skrip 6.1)

PYTHON

```
# SKRIP 6.1 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/6_1_fitur_deret.py)
ndvi = U.isi_waktu(U.nilai_ndvi(refl), baik, hari) # NDVI tanpa lubang
fitur = {"ndvi_rata": ndvi.mean(0), "ndvi_min": ndvi.min(0), "ndvi_maks": ndvi.max(0),
        "ndvi_tren": tren_tahun(ndvi), "ndvi_turun_maks": np.diff(ndvi, axis=0).min(0),
        "nbr_rata": nbr.mean(0), "nbr_min": nbr.min(0), "swirl_rata": b11.mean(0)} # dan seterusnya
```

Hasil: `fitur_deret.tif` dengan 12 band. Nama fitur disimpan sebagai nama band.

A.2 Mengambil nilai fitur pada titik latih

Buka `Titik_Latih.gpkg`: 200 titik, 25 per kelas, dengan field KELAS (1 sampai 8). Jalankan **Sample raster values** (Processing Toolbox ► Raster analysis) dengan `fitur_deret.tif`. Hasilnya field baru berisi nilai tiap fitur pada tiap titik.

A.3 Melatih dan menguji dulu (Skrip 6.2)

PYTHON

```
# SKRIP 6.2 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/6_2_latih_klasifikasi.py)
try:
    from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
except ImportError:
    from hutan_mini import RandomForestClassifier
s = processing.run("native:rastersampling", {"INPUT": titik, "RASTERCOPY": fitur_tif, "COLUMN_PREFIX": "f",
                                           "OUTPUT": "TEMPORARY_OUTPUT"})["OUTPUT"]
model = RandomForestClassifier(n_estimators=200, random_state=1).fit(X, y)
peta = model.predict(st.reshape(nb, -1).T).reshape(H, W)
```

Antarmuka sama persis, sehingga baris `import` memilih alat yang tersedia.

Dua cara menguji, dua hasil sangat berbeda. Skrip 6.2 membagi titik latih menjadi empat lipatan, lalu melatih pada tiga lipatan dan menguji pada satu (**uji silang**). Ada dua cara membagi:

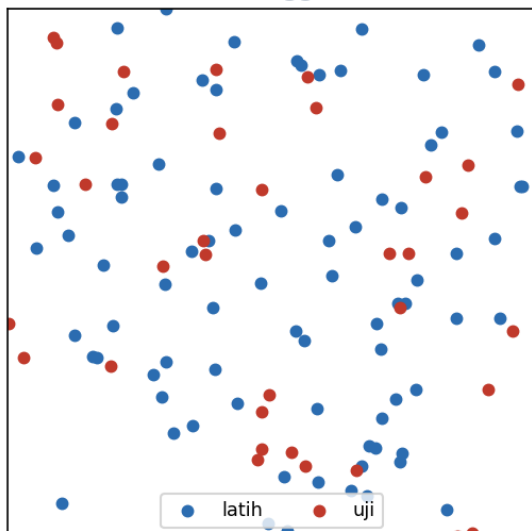
Cara membagi	Akurasi tiap lipatan	Rata-rata
Acak	0,98; 1,00; 1,00; 1,00	0,995
Blok ruang (empat kuadran area)	0,50; 0,89; 0,63; 0,44	0,617

[terbukti: dihitung dari data sintetis; hutan_mini.py]

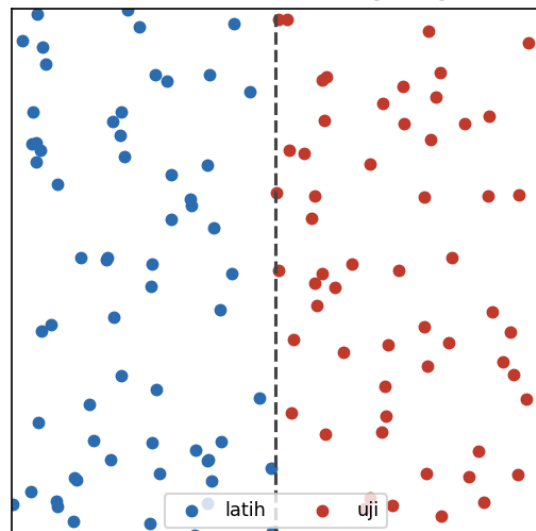
Mengapa bedanya begitu besar? Pada pembagian **acak**, tetangga yang mirip ikut ke kubu latih dan kubu uji, sehingga mesin tinggal "menyontek" tetangganya. Pada pembagian **blok**, uji dilakukan di tempat yang tidak pernah dilihat. Di area kecil ini, beberapa kelas hanya ada di satu kuadran, misalnya bekas bakar utama di Beta dan panen di Alpha, jadi saat satu kuadran disisihkan, mesin tidak pernah melihat kelas itu. Nilai 0,617 ini keras dan sebagian karena ukuran area. Intinya: **uji acak cenderung terlalu optimis**. Di pekerjaan nyata, wilayahnya luas dan tiap kelas tersebar di banyak tempat, sehingga uji blok memberi gambaran lebih jujur. Bab 7 memperdalam ini.

Ilustrasi 6.2: Acak lawan blok

Pemisahan acak: tetangga ikut ke dua kubu



Pemisahan blok: latih dan uji berjauhan



Skema; bukan tangkapan layar

A.4 Peta hasil dan fitur terpenting

Model akhir dilatih pada seluruh 200 titik dan dipakai pada seluruh 1.600 piksel. Lima fitur terpenting: `nbr_rata (0,13)`, `ndvi_rata (0,12)`, `ndvi_maks (0,12)`, `swirl_rata (0,12)`, dan `nbr_min (0,11)`.

Nilainya hampir sama karena banyak fitur saling menggantikan.

Luas hasil peta lawan luas acuan:

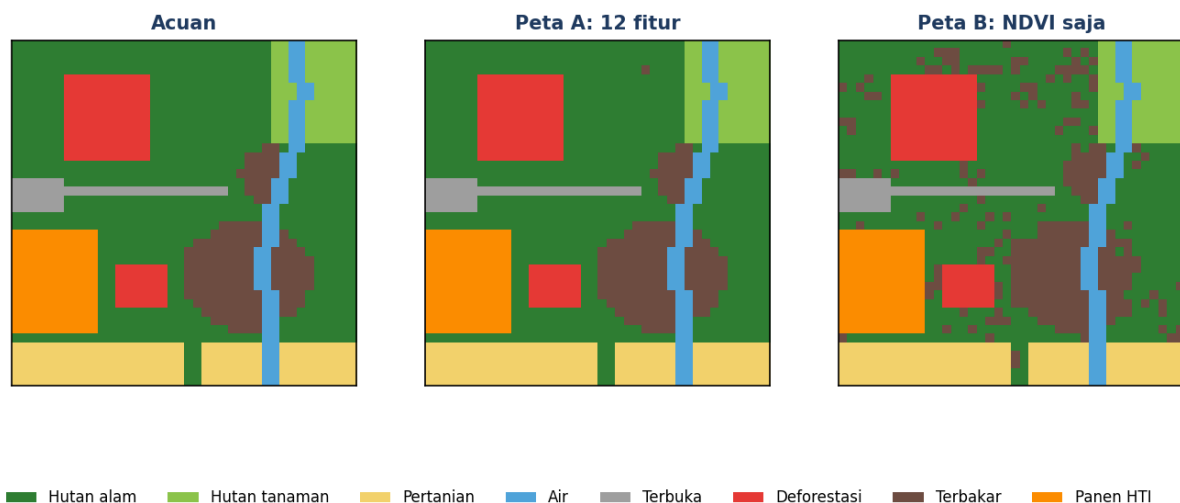
Kelas	Peta (ha)	Acuan (ha)
Hutan alam	7,99	8,00
Hutan tanaman	0,96	0,96
Pertanian	1,80	1,80
Air	0,80	0,80
Terbuka	0,43	0,43
Deforestasi	1,30	1,30
Terbakar	1,52	1,51
Panen hutan tanaman	1,20	1,20

Angka ini bukan ukuran kualitas: Kesesuaian peta dengan acuan di seluruh piksel adalah 0,999, tetapi itu **termasuk piksel latih** dan memakai kunci jawaban yang sama. Itu bukan uji mandiri. Uji mandiri yang benar ada di Bab 7.

A.5 Fitur apa yang diperlukan? Percobaan sederhana

Fitur menentukan hasil lebih daripada algoritmanya. Skrip 7.1 (Bab 7) melatih ulang hutan acak hanya dengan tujuh fitur NDVI, tanpa SWIR. Hasilnya: bekas bakar tercampur dengan hutan. Pelajaran: **berikan mesin informasi yang memang membedakan kelas.**

Ilustrasi 6.3: Peta klasifikasi



Skema; bukan tangkapan layar

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

1. **Fitur:** bangun raster multiband dari fitur (seperti 6.1) atau pakai raster multidimensi.

2. **Latih: Train Random Trees Classifier** (Image Analyst Tools, perlu ekstensi Image Analyst atau Spatial Analyst). Masukkan: raster dan **training feature class** dengan field `classname` dan `classvalue`. Parameter penting: **Max Number of Trees**, **Max Tree Depth**, dan **Max Number of Samples Per Class** (bawaan 1000). Hasilnya berkas `.ecd`, definisi classifier berformat JSON.
3. **Terapkan: Classify Raster** dengan berkas `.ecd`.
4. Dokumentasi Esri menyatakan semua yang di atas. Cocokkan dengan versi Anda. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

ArcMap **tidak punya padanan** untuk Random Trees yang saya temukan di dokumentasi. [CEK: periksa instalasi Anda]

1. Alternatif klasik: **Create Signatures** dari sampel latih, lalu **Maximum Likelihood Classification**. Dokumentasi ArcMap menyebut berkas signature berekstensi `.gsg`, dibuat dari Create Signature, Edit Signature, atau Iso Cluster, dan alat ini memerlukan lisensi Spatial Analyst.
2. Hutan acak dalam Python: lewat skrip di luar ArcMap, memakai Python 3 dan scikit-learn. [CEK]

Cek paham

1. Mengapa beda akurasi uji acak (0,995) dan uji blok (0,617) begitu besar?
2. Apa yang dimaksud fitur dalam klasifikasi deret waktu?
3. Mengapa menambah fitur SWIR memperbaiki pemisahan bekas bakar?

Jawaban:

1. Pada uji acak, tetangga yang mirip ikut ke dua kubu, sehingga mesin menyontek. Uji blok menguji di tempat yang belum pernah dilihat. Di area kecil ini, sebagian kelas juga hanya ada di satu blok.
2. Angka ringkas dari riwayat waktu sebuah piksel, misalnya NDVI rata-rata, NDVI minimum, atau tren.
3. Bekas bakar ditandai oleh turunnya NIR dan naiknya SWIR. NDVI saja tidak menangkap pembalikan itu sekuat NBR.

Kesalahan umum

- **Menguji pada data yang sama dengan latihan.** Akurasi nyaris sempurna, tetapi menyesatkan.
- **Memakai pembagian acak untuk data bertetangga.** Hasilnya terlalu optimis. Pakai blok ruang.
- **Memberi fitur yang bocor dari jawaban.** Fitur tidak boleh dihitung dari peta acuan.
- **Sampel latih tidak seimbang atau tidak mewakili.** Kelas langka perlu cukup contoh.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: hutan acak adalah banyak pohon yang memberi suara. Fitur dari deret waktu membuat satu model bisa membedakan kelas yang tampak mirip pada satu hari. Cara menguji menentukan seberapa jujur akurasi.

Latihan:

1. Jalankan Skrip 6.1 dan 6.2. Catat dua angka uji silang.
2. Ubah `n_estimators` di Skrip 6.2 menjadi 20, lalu 400. Apa perubahannya pada akurasi uji silang blok?
3. Hapus tiga fitur NBR dari `x` dan latih ulang. Kelas mana yang menurun?

Tabel perbandingan: machine learning pada deret waktu

Langkah	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8	Status
Ambil nilai fitur pada titik	Sample raster values	Extract Multi Values to Points [CEK]	Extract Multi Values to Points [CEK]	QGIS terbukti
Latih Random Forest	OTB, scikit-learn, atau hutan_mini.py	Train Random Trees Classifier	Tidak ada padanan	QGIS: hutan_mini terbukti; Pro: dokumentasi
Terapkan model	predict lewat skrip	Classify Raster	Maximum Likelihood Classification	Pro: dokumentasi; ArcMap: dokumentasi
Uji silang blok	Skrip	Skrip [CEK]	Skrip [CEK]	QGIS terbukti

BAB 7: Seberapa Percaya Peta Ini? Validasi dan Koreksi Luas

Studi kasus: "Angka ini boleh masuk laporan?"

Peta sudah jadi. Kepala Seksi menatap angka 2,64 ha bekas terbakar di peta pertama Anda. "Kalau saya tulis di laporan ke provinsi, apakah ada yang akan menyanggah?" Pertanyaan itu tidak bisa dijawab dengan "kelihatannya bagus". Anda perlu **mengukur** kebenaran peta, dan menyebut seberapa ragu angkanya.

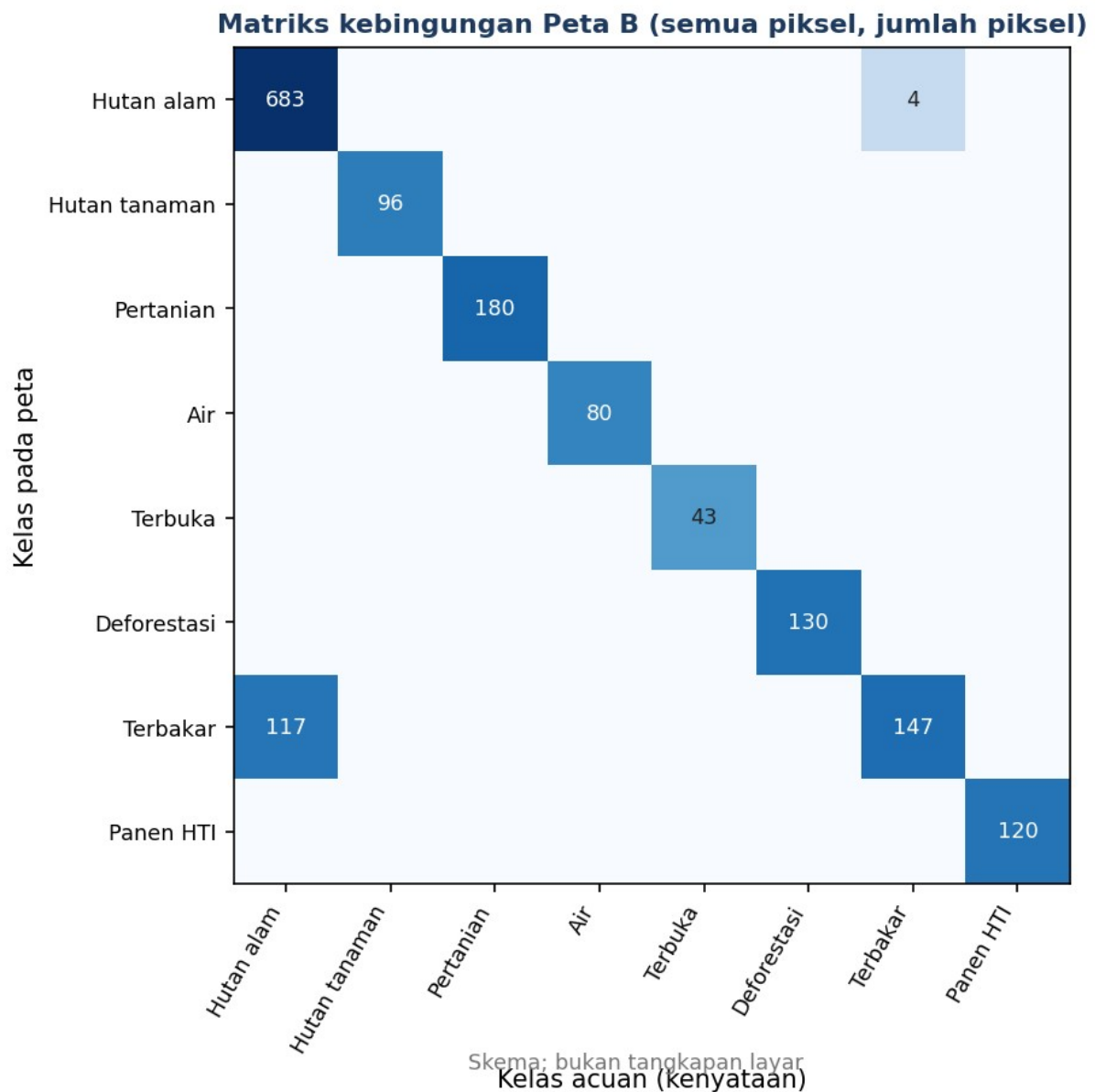
Konsep: validasi dalam tiga kalimat

Validasi itu seperti ujian dengan soal yang belum pernah dilihat murid: nilai ujian latihan yang soalnya sama dengan bahan belajar tidak membuktikan apa-apa. Kita menarik **sampel acak** titik di peta, memeriksa kebenarannya dengan data acuan yang lebih tepercaya (citra resolusi tinggi atau survei lapangan), lalu membuat **matriks kebingungan**. Dari matriks itu keluar akurasi, dan juga **koreksi luas**: luas yang sudah memperhitungkan kesalahan peta.

Istilah baru bab ini:

- **Matriks kebingungan**: tabel yang menyilangkan kelas peta dengan kelas acuan.
- **Akurasi pengguna (UA)**: dari semua piksel yang peta sebut kelas X, berapa persen yang benar kelas X.
- **Akurasi produsen (PA)**: dari semua piksel yang sebenarnya kelas X, berapa persen yang peta temukan.
- **Sampel acak berstrata**: sampel acak dengan jumlah tetap di tiap kelas peta, supaya kelas langka ikut terwakili.
- **Luas terkoreksi**: perkiraan luas yang sudah menyesuaikan kesalahan peta, disertai rentang ketidakpastian.

Ilustrasi 7.1: Matriks kebingungan



Dua jenis kesalahan, dua sisi

- **Kesalahan komisi:** peta bilang "terbakar", kenyataannya hutan. Diukur oleh akurasi pengguna.
- **Kesalahan omisi:** kenyataannya terbakar, peta tidak menandainya. Diukur oleh akurasi produsen.

Dua peta bisa sama akuratnya secara keseluruhan namun berbeda pada dua sisi ini. Untuk melaporkan luas, kedua sisi penting.

BAGIAN A | QGIS

Bagian A: Validasi di QGIS (Skrip 7.1)

Skrip 7.1 menguji **dua peta**: Peta A (hutan acak dengan 12 fitur, Bab 6) dan Peta B (hutan acak yang hanya melihat NDVI, tanpa SWIR). Acuannya `Acuan_Dinamika.tif`. Dalam praktik, acuan berasal dari tafsir citra resolusi tinggi atau survei lapangan, bukan dari kunci jawaban seperti ini.

A.1 Menyusun sampel

Aturan sampel dalam skrip: **20 titik acak per kelas peta**, tidak boleh jatuh di titik latih. Kelas kecil dengan piksel bebas kurang dari 20 diambil sebanyak yang ada (kelas Terbuka: 18).

PYTHON

```
# SKRIP 7.1 (cuplikan; berkas lengkap: skrip/7_1_validasi.py)
def sampel_berstrata(peta, seed):
    rng = np.random.default_rng(seed)
    for k in np.unique(peta):
        kand = np.argwhere((peta == k) & ~pakai_latih)          # piksel kelas k di luar titik latih
        pilih = rng.choice(len(kand), size=min(N_STRATUM, len(kand)), replace=False)
        hasil[int(k)] = [(int(kand[p][0]), int(kand[p][1])), int(acuan[kand[p][0], kand[p][1]])] for p in
        pilih]
```

Padanan di antarmuka QGIS: **Polygonize** peta, **Dissolve** per kelas, lalu **Random points in polygons** dengan jumlah titik per fitur, dan **Sample raster values** pada acuan. Alat ini berjalan di uji, tetapi hasil titiknya tidak identik antar-jalan walau SEED diisi. Karena itu angka di buku memakai pengundi dalam skrip yang bisa diulang persis.

A.2 Matriks, akurasi, dan luas terkoreksi

Rumus (Olofsson dan kawan-kawan, 2014), dengan W_i = bagian luas kelas peta ke- i , n_i = jumlah sampel kelas i , n_{ij} = jumlah sampel kelas peta i dengan acuan j :

RUMUS

```
p_ij          = W_i * n_ij / n_i
Akurasi keseluruhan = jumlah p_ii
Akurasi pengguna(i) = p_ii / jumlah_j p_ij
Akurasi produsen(j)  = p_jj / jumlah_i p_ij
Luas terkoreksi(j)   = Luas_total * jumlah_i p_ij
Galat baku(j)        = Luas_total * akar( jumlah_i W_i^2 * (n_ij/n_i) * (1 - n_ij/n_i) / (n_i - 1) )
Rentang 95%          = luas terkoreksi +/- 1,96 * galat baku
```

Hasil Peta A (12 fitur):

Ukuran	Nilai
Sampel	158 titik
Akurasi keseluruhan	0,995
Kesalahan	1 titik "terbakar" yang acuannya hutan alam
Luas terbakar: peta, terkoreksi, acuan	1,52 ha; 1,46 ha (plus minus 0,12); 1,51 ha
Luas deforestasi: peta, terkoreksi, acuan	1,30 ha; 1,30 ha (plus minus 0,00); 1,30 ha

Hasil Peta B (NDVI saja): matriks pada 158 sampel, baris = kelas peta, kolom = kelas acuan.

Kelas peta	Hutan alam	Terbakar	Kelas lain	Jumlah
Hutan alam	20	0	0	20
Terbakar	10	10	0	20
Enam kelas lain	semuanya tepat			118

Ukuran	Nilai
Akurasi keseluruhan	0,915
Akurasi pengguna kelas Terbakar	0,50
Akurasi produsen kelas Terbakar	1,00
Luas terbakar: peta, terkoreksi, acuan	2,64 ha; 1,44 ha (plus minus 0,54); 1,51 ha
Luas hutan alam: peta, terkoreksi, acuan	6,87 ha; 8,07 ha (plus minus 0,54); 8,00 ha

[terbukti: dihitung dari data sintetis dengan sampel berbenih tetap]

Cara membaca hasil Peta B. Peta menandai 2,64 ha terbakar. Tetapi setengah titik "terbakar" yang diperiksa ternyata hutan biasa (akurasi pengguna 0,50), jadi luas sebenarnya hanya sekitar 1,44 ha, dengan rentang kira-kira 0,90 sampai 1,98 ha. Angka mentah peta hampir dua kali terlalu besar. Kunci jawaban (1,51 ha) memang berada di dalam rentang itu. Itulah gunanya koreksi luas: peta yang salah pun bisa memberi **angka luas yang jujur**, asalkan sampelnya baik. Menghitung piksel peta mentah tidak pernah jujur.

A.3 Kestabilan terhadap undian sampel

Sampel bisa diundi berkali-kali. Pada lima undian lain, akurasi keseluruhan Peta B berkisar 0,874 sampai 0,940, sedangkan Peta A 0,995 sampai 1,000. Rentang itu menjadi pengingat: satu angka akurasi hanyalah satu undian. Laporkan akurasi bersama ketidakpastiannya.

Sampel kecil, rentang lebar: Setiap kelas hanya diwakili 20 titik. Itu cukup untuk belajar, belum untuk laporan resmi. Dalam praktik, kelas langka sebaiknya punya jumlah sampel yang jauh lebih besar. Olofsson dan kawan-kawan (2014) membahas cara menentukan jumlah sampel.

A.4 Dari uji acak ke uji yang jujur

Ingat Bab 6: uji silang acak memberi 0,995, sedangkan uji blok memberi 0,617. Sampel validasi yang baik **tidak diambil dari tempat yang sama** dengan titik latih, dan lebih baik lagi bila diambil secara independen oleh orang lain, dari sumber acuan yang berbeda.

Lima kebiasaan untuk laporan yang bisa dipertanggungjawabkan: 1. Sampel validasi diambil **acak berstrata**, bukan sekadar titik yang mudah dikunjungi. 2. Sampel validasi **tidak boleh** dipakai melatih model. 3. Acuan lebih tepercaya daripada peta yang diuji. 4. Laporkan matriks kebingungan lengkap, bukan hanya satu angka akurasi. 5. Laporkan luas **terkoreksi** dengan rentang kepercayaan.

Hasilnya: Anda bisa menjawab Kepala Seksi. "Peta pertama melebih-lebihkan bekas bakar. Pakai angka terkoreksi sekitar 1,4 ha dengan rentang 0,9 sampai 2,0 ha. Dengan fitur SWIR (Peta A), angkanya hampir tidak perlu dikoreksi."

BAGIAN B | ArcGIS Pro

Bagian B: ArcGIS Pro

Pro memiliki rantai alat khusus di ekstensi Spatial Analyst atau Image Analyst.

1. **Create Accuracy Assessment Points** membuat titik sampel dari peta klasifikasi.
2. Isi nilai kelas acuan pada field **GrndTruth** (lewat penafsiran citra atau survei). **Update Accuracy Assessment Points** menyalin kelas peta ke field **Classified**.
3. **Compute Confusion Matrix** menghitung akurasi pengguna, akurasi produsen, dan indeks Kappa, dan keluarannya tabel. Menurut dokumentasi Esri, titik masukan harus punya field **Classified** dan **GrndTruth**. Dokumentasi Pro juga menyebut **Intersection over Union** dan akurasi keseluruhan.
4. **Koreksi luas** (rumus Olofsson) tidak ada alatnya. Hitung sendiri di Python atau lembar kerja memakai rumus di atas. [CEK]

BAGIAN C | ArcMap 10.8

Bagian C: ArcMap 10.8

1. **Create Accuracy Assessment Points** (Spatial Analyst Toolbox). Dokumentasi ArcMap menyebut tiga strategi sampel: **Stratified Random** (jumlah titik proporsional dengan luas kelas, bawaan), **Equalized Stratified Random** (jumlah titik sama di tiap kelas), dan **Random**. Untuk kelas langka, pilih **Equalized Stratified Random**.
2. **Compute Confusion Matrix**: menghitung akurasi pengguna, akurasi produsen, dan Kappa. Titik harus punya field **CLASSIFIED** dan **GROUND_TRUTH**, dan lisensinya **Spatial Analyst**.
3. **Koreksi luas**: hitung sendiri, seperti di Pro. [CEK]

Cek paham

1. Peta menandai 2,64 ha terbakar dan akurasi penggunaanya 0,50. Mengapa luas sebenarnya sekitar separuhnya?

2. Mengapa sampel validasi tidak boleh sama dengan titik latih?
3. Apa beda akurasi pengguna dan akurasi produsen?

Jawaban:

1. Separuh dari area yang ditandai terbakar ternyata bukan terbakar. Luas terkoreksi memperhitungkan itu.
2. Model sudah "hafal" titik latih, sehingga nilai ujinya menjadi terlalu bagus dan tidak berarti.
3. Akurasi pengguna: dari yang peta sebut kelas X, berapa yang benar. Akurasi produsen: dari yang sebenarnya kelas X, berapa yang peta temukan.

Kesalahan umum

- **Melaporkan luas dari hitungan piksel peta mentah.** Gunakan luas terkoreksi.
- **Hanya melaporkan akurasi keseluruhan.** Kelas langka bisa buruk sementara angka keseluruhan tinggi.
- **Sampel terlalu sedikit di kelas langka.** Rentang kepercayaan menjadi lebar.
- **Memakai acuan yang lebih lemah daripada peta.** Acuan harus lebih tepercaya.
- **Mengulang uji sampai hasilnya bagus.** Tetapkan rancangan sampel sebelum melihat hasil.

Ringkasan dan latihan

Ringkasan: validasi memakai sampel acak berstrata dan acuan independen. Matriks kebingungan memberi akurasi pengguna dan produsen. Luas terkoreksi memperbaiki angka peta dan menyebut ketidakpastiannya.

Latihan:

1. Jalankan Skrip 7.1. Ubah N_STRATUM menjadi 10, lalu 30. Bagaimana lebar rentang luas terbakar Peta B?
2. Ubah benih acak di Skrip 7.1 dan jalankan beberapa kali. Berapa rentang akurasi keseluruhan?
3. Hitung sendiri luas terkoreksi kelas Terbakar Peta B dari tabel matriks di atas, dengan rumus. Cocokkah?

Tabel perbandingan: validasi

Langkah	QGIS	ArcGIS Pro	ArcMap 10.8	Status
Sampel acak berstrata	Random points in polygons atau skrip	Create Accuracy Assessment Points	Create Accuracy Assessment Points	QGIS: terbukti; Esri: dokumentasi ArcMap dibaca
Matriks kebingungan	Skrip NumPy	Compute Confusion Matrix	Compute Confusion Matrix	Dokumentasi dibaca
Akurasi pengguna dan produsen	Skrip NumPy	Compute Confusion Matrix	Compute Confusion Matrix	Dokumentasi dibaca
Luas terkoreksi dan rentang	Skrip NumPy	Hitung sendiri	Hitung sendiri	QGIS: terbukti

Penutup seri: ceklis kesiapan menuju M4

Anda sudah menempuh satu alur lengkap pemantauan: **susun, bersihkan, pahami musim, deteksi perubahan, klasifikasi, validasi**. Sebelum membuka M4 (pengembangan dan publikasi), periksa diri:

- Saya bisa menyusun deret waktu bertanggal dan menjelaskan mengapa waktu dihitung dalam hari.
- Saya bisa membuang awan dan memeriksa jumlah pengamatan valid.
- Saya bisa membedakan irama musiman dari perubahan sungguhan.
- Saya bisa mendeteksi deforestasi dan kebakaran, dan menyebut tanggalnya sebagai rentang.
- Saya bisa melatih model dan tahu mengapa uji acak terlalu optimis.
- Saya bisa menyampaikan luas bersama ketidakpastiannya.

Di M4, semua ini dibungkus menjadi alat yang bisa dipakai orang lain: plugin, layanan web, dan dasbor pemantauan.

Lanjut belajar

Seri berikutnya adalah **M4: Pengembangan dan Publikasi**. Pindai kode QR ini untuk membuka halaman seri tersebut dan unduhannya.



Glosarium

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

Acuan (reference data): data yang dianggap benar dan dipakai untuk menguji sebuah peta. Dalam praktik berasal dari tafsir citra resolusi tinggi atau survei lapangan; di buku ini berupa kunci jawaban sintetis. *Bab 7.*

Akurasi keseluruhan (overall accuracy): bagian titik sampel yang kelas petanya sama dengan kelas acuan. Satu angka ini bisa menyembunyikan kelas langka yang buruk. *Bab 7.*

Akurasi pengguna (user's accuracy, UA): dari semua piksel yang peta sebut kelas X, berapa persen yang benar kelas X. Ukuran ini menangkap kesalahan komisi. *Bab 7.*

Akurasi produsen (producer's accuracy, PA): dari semua piksel yang sebenarnya kelas X, berapa persen yang berhasil ditemukan peta. Ukuran ini menangkap kesalahan omisi. *Bab 7.*

Ambang (threshold): batas angka untuk menyebut sesuatu "berubah" atau "terbakar". Ambang dari buku atau literatur perlu dikalibrasi untuk data Anda. *Bab 4, 5.*

Amplitudo (amplitude): selisih nilai tertinggi dan terendah dalam satu deret. Sawah beramplitudo besar, hutan alam kecil. *Bab 3.*

Anomali (anomaly): selisih nilai satu tanggal dari nilai "biasa" piksel itu. Anomali hanya alarm dini, bukan bukti. *Bab 3.*

Band: satu lapisan angka dalam citra, misalnya merah atau inframerah dekat. Dalam ekspresi QGIS band dirujuk dengan nomor, misalnya @4. *Bab 1.*

Bekas bakar (burned area): area yang sudah terbakar dan tampak pada citra sesudah kejadian. Titik panas bukan peta bekas bakar. *Bab 5.*

Benih acak (seed): angka awal pengundi acak. Dengan benih tetap, undian sampel bisa diulang persis. *Bab 7.*

CCDC (Continuous Change Detection and Classification): algoritma deteksi titik patah pada deret waktu. Di ArcGIS Pro tersedia lewat alat Analyze Changes Using CCDC. *Bab 4.*

Cirrus (thin cirrus): awan tipis di ketinggian, kode 10 pada SCL. Tepinya bisa lolos dari mask dan meninggalkan "kabut" pada piksel. *Bab 2.*

Cloud Raster Format (CRF): format keluaran raster multidimensi di ArcGIS Pro, misalnya hasil Generate Trend Raster. *Bab 3.*

Data sintetis (synthetic data): data buatan skrip penulis, bukan data lapangan. Hasil analisisnya bukan kondisi hutan sebenarnya. *Pendahuluan.*

Deforestasi (deforestation): hilangnya tutupan hutan karena pembukaan lahan. Dibedakan dari panen hutan tanaman yang terencana. *Bab 4.*

Deret waktu (time series): kumpulan citra dari lokasi yang sama pada tanggal berbeda. Perbedaan antar citra menunjukkan perubahan. *Bab 1.*

Deteksi perubahan dua waktu (bi-temporal change detection): membandingkan citra sebelum dan sesudah, seperti permainan "temukan perbedaan". Cepat untuk luas, tetapi tidak bisa menyebut tanggal. *Bab 4.*

dNBR (differenced NBR): NBR sebelum dikurangi NBR sesudah. Makin besar nilainya, makin parah terbakarnya. *Bab 5.*

Fenologi (phenology): pola musiman kehidupan tumbuhan: tumbuh, puncak, layu. *Bab 3.*

Fitur (feature): angka yang menjelaskan sebuah piksel untuk model, misalnya NDVI rata-rata atau NBR minimum. *Bab 6.*

Galat baku (standard error): ukuran ketidakpastian sebuah perkiraan. Dipakai untuk membuat rentang 95% pada luas terkoreksi. *Bab 7.*

Hutan acak (random forest): banyak pohon keputusan yang memberi suara; kelas dengan suara terbanyak menang. Hasilnya lebih stabil daripada satu pohon. *Bab 6.*

Hutan tanaman: hutan yang ditanam dan dipanen terencana. Panennya membuat NDVI turun sedalam deforestasi, sehingga perlu peta kawasannya. *Bab 3, 4.*

Interpolasi linear temporal (temporal linear interpolation): menarik garis lurus antara dua pengamatan bersih untuk mengisi tanggal yang hilang. Kurang cocok untuk lompatan mendadak. *Bab 2.*

Kepekaan (sensitivity, recall): bagian piksel acuan yang berhasil ditemukan, yaitu tepat dibagi (tepat ditambah terlewat). *Bab 4.*

Kepentingan fitur (feature importance): seberapa sering sebuah fitur dipakai model untuk memisahkan kelas. *Bab 6.*

Kesalahan komisi (commission error): peta menyebut kelas X, kenyataannya bukan. Diukur oleh akurasi pengguna. *Bab 7.*

Kesalahan omisi (omission error): kenyataannya kelas X, tetapi peta tidak menandainya. Diukur oleh akurasi produsen. *Bab 7.*

Komposit median (median composite): nilai tengah dari banyak tanggal pada tiap piksel. Awan yang jarang muncul ikut tersisih. *Bab 2.*

Landsat: satelit pengamat bumi yang citranya sering digabung dengan Sentinel-2. Resolusinya 30 m dan skala reflektansinya berbeda. *Bab 1.*

Luas minimum (minimum mapping unit): gumpalan piksel yang lebih kecil dari batas ini dibuang sebagai derau. Di Bab 4 batasnya 5 piksel. *Bab 4.*

Luas terkoreksi (adjusted area): perkiraan luas yang sudah menyesuaikan kesalahan peta, disertai rentang ketidakpastian. Lebih jujur daripada menghitung piksel peta mentah. *Bab 7.*

Mask (penutup): peta penanda piksel yang dipakai atau dibuang. Dalam buku ini mask dibuat dari SCL untuk membuang awan. *Bab 2.*

Matriks kebingungan (confusion matrix): tabel yang menyilangkan kelas peta dengan kelas acuan. Dari sini keluar akurasi pengguna dan akurasi produsen. *Bab 7.*

Metrik deret waktu (time series metrics): angka ringkas dari satu deret, misalnya rata-rata, amplitudo, dan tren. *Bab 3.*

Mosaic dataset: wadah ArcGIS untuk banyak berkas raster. Dengan field tanggal, ia bisa dipakai sebagai deret waktu. *Bab 1.*

NBR (Normalized Burn Ratio): (NIR dikurangi SWIR2) dibagi (NIR ditambah SWIR2). Di Sentinel-2 memakai band B08 dan B12. *Bab 5.*

NDVI: indeks kehijauan, (NIR dikurangi merah) dibagi (NIR ditambah merah). Di data buku ini memakai band 4 dan band 3. *Bab 1.*

NIR (near infrared): inframerah dekat. Tumbuhan sehat memantulkannya dengan kuat. *Bab 5.*

NoData: nilai penanda piksel yang tidak punya data, misalnya piksel berawan yang dibuang. *Bab 2.*

Pengamatan berturut-turut (consecutive observations): syarat bahwa jatuhnya nilai harus bertahan beberapa pengamatan bersih. Syarat ini mencegah awan menipu deteksi. *Bab 4.*

Pengamatan valid (valid observations): jumlah tanggal bersih pada sebuah piksel. Periksa petanya sebelum memercayai komposit. *Bab 2.*

Penyangga (buffer): area dengan jarak tertentu di sekeliling titik atau bentuk. Dipakai agar titik panas diuji dengan sedikit toleransi jarak. *Bab 5.*

Pohon keputusan (decision tree): aturan bercabang "jika... maka...", seperti permainan tebak-tebakan. *Bab 6.*

Presisi (precision): bagian piksel terdeteksi yang benar, yaitu tepat dibagi (tepat ditambah salah tambah). *Bab 4.*

Profil waktu (temporal profile): riwayat nilai satu piksel sepanjang tanggal. Dibaca seperti detak jantung. *Bab 1.*

Raster multidimensi (multidimensional raster): istilah ArcGIS Pro untuk tumpukan raster yang punya dimensi waktu. *Bab 1.*

Reflektansi (reflectance): pantulan permukaan, angka 0 sampai 1. *Bab 1.*

RMSE (root mean square error): ukuran galat rata-rata. Di Bab 2 dipakai untuk menilai tambalan hasil interpolasi. *Bab 2.*

Salah tambah (false positive): piksel yang ditandai berubah atau terbakar padahal tidak. *Bab 4.*

Sampel acak berstrata (stratified random sample): sampel acak dengan jumlah tetap di tiap kelas peta, supaya kelas langka ikut terwakili. *Bab 7.*

Sampel latih (training samples): titik yang kelasnya sudah diketahui, dipakai model untuk belajar. *Bab 6.*

SCL (Scene Classification Layer): band penanda kelas piksel pada produk Sentinel-2 L2A. Kode 3 bayangan awan, 4 vegetasi, 5 bukan vegetasi, 6 air, 8 dan 9 awan, 10 cirrus. *Bab 2.*

Selisih (differencing): citra sesudah dikurangi citra sebelum. *Bab 4.*

Sentinel-2: satelit pengamat bumi dengan piksel 10 m pada beberapa band. Data latihan buku ini meniru ukuran pikselnya, tetapi bukan data aslinya. *Pendahuluan, Bab 1.*

Sidik jari musiman (seasonal signature): irama khas tiap tutupan lahan sepanjang tahun. Hutan berdetak tenang, sawah cepat dan tinggi. *Bab 3.*

Sieve: alat GDAL yang membuang gumpalan piksel lebih kecil dari batas yang Anda tentukan. *Bab 4.*

Simpangan baku (standard deviation): ukuran seberapa jauh nilai tersebar dari rata-ratanya. Dipakai untuk melihat ketidakstabilan sebuah deret. *Bab 3.*

Stempel waktu (timestamp): tanggal yang menempel pada citra atau band. *Bab 1.*

SWIR (shortwave infrared): inframerah gelombang pendek; di Sentinel-2 dipakai band B11 dan B12. Naik setelah kebakaran. *Bab 5.*

Temporal Controller: panel QGIS untuk memutar layer menurut tanggal. Ia hanya mengatur tampilan, tidak mengubah data. *Bab 1.*

Terlewat (false negative): piksel yang sebenarnya berubah atau terbakar tetapi tidak terdeteksi. *Bab 4.*

Tingkat keparahan (burn severity): kelas dNBR dari ringan sampai berat. Angka kelasnya dari literatur dan harus dikalibrasi. *Bab 5.*

Titik panas (hotspot): titik deteksi suhu tinggi oleh satelit. Ia indikator api, bukan peta bekas bakar. *Bab 5.*

Titik patah (break): saat deret berubah nilai secara menetap. Deteksinya bisa menyebut tanggal perubahan. *Bab 4.*

Tren (trend): arah umum jangka panjang, diukur sebagai kemiringan garis lurus terhadap waktu. Hitung terhadap hari, bukan nomor urut. *Bab 3.*

Tumpukan (stack): semua tanggal digabung menjadi satu berkas, satu tanggal satu band. *Bab 1.*

Uji silang (cross-validation): melatih model pada sebagian titik dan menguji pada sisanya, bergiliran. Pembagian acak cenderung terlalu optimis; pembagian blok ruang lebih jujur. *Bab 6.*

Daftar Pustaka

Daftar ini memuat sumber yang dipakai menyusun buku ini. Semua tautan dibuka dan dicek pada 7 Oktober 2026.

Dokumentasi resmi

- Esri. (t.t.). *Analyze Changes Using CCDC (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation, Esri. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/analyze-changes-using-ccdc.html>.
- Esri. (t.t.). *Build Multidimensional Info (Data Management Tools)*. ArcGIS Pro documentation, Esri. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/data-management/build-multidimensional-info.html>.
- Esri. (t.t.). *Cell Statistics (Spatial Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation, Esri. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/spatial-analyst/cell-statistics.html>.
- Esri. (t.t.). *Cell Statistics (Spatial Analyst)*. ArcMap documentation, Esri. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/cell-statistics.htm>.
- Esri. (t.t.). *Compute Confusion Matrix (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation, Esri. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/compute-confusion-matrix.html>.
- Esri. (t.t.). *Compute Confusion Matrix (Spatial Analyst)*. ArcMap documentation, Esri. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/compute-confusion-matrix.htm>.
- Esri. (t.t.). *Create Accuracy Assessment Points (Spatial Analyst)*. ArcMap documentation, Esri. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/create-accuracy-assessment-points.htm>.
- Esri. (t.t.). *Detect Change Using Change Analysis Raster (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation, Esri. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/detect-change-using-change-analysis-raster.html>.
- Esri. (t.t.). *Generate Trend Raster (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation, Esri. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/generate-trend-raster.html>.
- Esri. (t.t.). *Maximum Likelihood Classification (Spatial Analyst)*. ArcMap documentation, Esri. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/maximum-likelihood-classification.htm>.
- Esri. (t.t.). *Temporal profile chart*. ArcGIS Pro documentation, Esri. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/help/data/imagery/temporal-profile-chart.html>.
- Esri. (t.t.). *Train Random Trees Classifier (Image Analyst Tools)*. ArcGIS Pro documentation, Esri. <https://doc.esri.com/en/arcgis-pro/latest/tool-reference/image-analyst/train-random-trees-classifier.html>.
- GRASS Development Team. (t.t.). *r.series*. GRASS 8.5 Documentation, OSGeo. <https://grass.osgeo.org/grass-stable/manuals/r.series.html>.

- QGIS Project. (t.t.). *Raster analysis*. QGIS Documentation (latest), bab 24.1.18. https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasteranalysis.html.
- QGIS Project. (t.t.). *Raster Properties Dialog*. QGIS Documentation (latest), bab 13.1. https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/working_with_raster/raster_properties.html.
- Sentinel Hub. (t.t.). *Sentinel-2 L2A Scene Classification Map*. Sentinel Hub custom scripts. <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/scene-classification>.
- U.S. Geological Survey. (2026). *How do I use a scale factor with Landsat Level-2 science products?* USGS FAQ. <https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-a-scale-factor-landsat-level-2-science-products>.

Makalah dan buku

- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). *Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio*. Dalam FIREMON, seri RMRS-GTR-164-CD (LA 1-51). USGS Publications Warehouse. <https://www.usgs.gov/publications/landscape-assessment-ground-measure-severity-composite-burn-index-and-remote-sensing>.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). *Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change*. Remote Sensing of Environment, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.

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/

MASTER CLASS · SERI M3

DERET WAKTU DAN PEMODELAN

Memantau hutan dan lahan dari waktu ke waktu: deret waktu citra, deteksi perubahan, machine learning, dan validasi (kehutanan dan pertanian).

Yang akan Anda pelajari

- 1** Dari Foto ke Film: Menyusun Deret Waktu
- 2** Menyingkirkan Awan: Mask, Komposit, dan Menambal Lubang
- 3** Membaca Irama Alam: Musim, Tren, dan Anomali
- 4** Menangkap Hutan yang Hilang: Deteksi Deforestasi
- 5** Jejak Api: Bekas Kebakaran, NBR, dan Titik Panas
- 6** Mesin yang Belajar: Hutan Acak pada Deret Waktu
- 7** Seberapa Percaya Peta Ini? Validasi dan Koreksi Luas



**Pindai untuk membuka
seluruh seri buku GIS**

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