



**Algorithm Theoretical Basis Document
(ATBD)**

Koleksi 4.1

Versi 1

Februari 2026

Ringkasan Eksekutif	3
1. Pendahuluan	4
1.1. Ruang Lingkup	4
1.2. Overview	4
1.3. Cakupan Wilayah	5
1.4. Aplikasi Utama	8
2. Informasi Dasar and Latar Belakang	9
2.1. Jaringan MapBiomias Indonesia	9
2.2. Data Penginderaan Jauh	10
2.3. Google Earth Engine dan MapBiomias	10
3. Metodologi MapBiomias Indonesia	11
3.1. Deskripsi Metodologi	11
3.2. Landsat Mosaics	12
3.3. Feature Space (Variabel Input)	15
3.4. Klasifikasi	17
3.4.1. Sistem klasifikasi	17
3.4.2. Legenda	17
3.4.3. Training Samples	18
3.4.4. Random Forest	19
3.4.5. Klasifikasi	20
3.4.6. Pascaklasifikasi	20
3.4.6.1. Gap Fill	21
3.4.6.2. Filter Spasial	21
3.4.6.3. Filter Temporal	22
3.4.6.4. Filter Frekuensi	23
3.4.6.5. Filter Insiden	23
3.4.7. Pengembangan Koleksi 4.1	24
4. Integrasi Peta	25
5. Strategi Validasi	25
5.1. Validasi dengan Peta Referensi	25
5.2. Validasi dengan Sampel Independen	25
Referensi	28

Ringkasan Eksekutif

Meningkatnya perubahan lahan dan kontribusinya terhadap perubahan iklim saat ini telah menjadi perhatian global. Indonesia menjadi salah satu dari lima negara terbesar penyumbang karbon dunia, dengan sebesar 86% dari total emisi karbon di Indonesia berasal dari perubahan lahan [1]. Pemahaman yang mendalam mengenai dinamika penggunaan lahan menjadi krusial untuk menyeimbangkan pembangunan ekonomi dengan upaya mitigasi perubahan iklim. Data yang andal dan terbuka mengenai faktor pendorong dan dampak perubahan lahan merupakan dasar bagi perumusan kebijakan dan strategi pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan.

Inisiatif MapBiomas, yang didirikan pada 2015 oleh konsorsium universitas, organisasi masyarakat sipil, dan perusahaan teknologi di Brasil, menawarkan pendekatan kolaboratif, cepat, dan efisien biaya untuk menghasilkan peta tutupan dan penggunaan lahan tahunan dari dataset berskala besar. Tujuan utama inisiatif ini adalah memperkuat kapasitas lokal di negara-negara tropis dalam menghasilkan data penginderaan jauh yang akurat dan kontekstual, guna mendukung pengambilan keputusan pada tingkat pemerintahan, masyarakat sipil, dan sektor swasta.

Hingga 2026, MapBiomas telah beroperasi di 17 negara dengan lebih dari 130 institusi dan 500 kontributor. Di Indonesia, sejak 2019, Auriga Nusantara dan Woods and Wayside International memfasilitasi koordinasi inisiatif ini dengan sembilan organisasi masyarakat sipil dan sepuluh universitas lokal untuk melakukan penilaian akurasi peta.

MapBiomas Indonesia telah menerbitkan lima koleksi peta berturut-turut. Koleksi 1 (2000–2019) mengklasifikasikan 10 kelas tutupan dan penggunaan lahan, sementara Koleksi 2 (2000–2022) menambahkan kelas sawah dan mengimplementasikan penilaian akurasi tahunan. Koleksi 3 (2000–2023) mencakup hutan gambut dan kawasan perkotaan, dan Koleksi 4 (1990–2024) memperluas baseline historis. Koleksi 4.1 (1990–2024) memperbaiki konsistensi data historis dan representasi transisi dari kelas alami ke kelas antropogenik, melalui integrasi data GEDI dan revisi aturan transisi, khususnya untuk vegetasi non-hutan alami yang kini dikategorikan sebagai antropogenik akibat transformasi historis yang dipicu aktivitas manusia.

Dokumen Basis Teoretis Algoritma (ATBD) ini memaparkan kerangka metodologis yang diterapkan pada MapBiomas Indonesia Koleksi 4.1, termasuk dataset yang digunakan dan prosedur analisis. Seluruh dataset, output klasifikasi, kode, statistik, serta analisis tambahan dapat diakses secara publik melalui platform MapBiomas Indonesia di platforma.landy.mapbiomas.id, sedangkan algoritma klasifikasi tersedia terbuka melalui repositori resmi GitHub di <https://github.com/mapbiomas-indonesia>.

1. Pendahuluan

1.1. Ruang Lingkup

Dokumen ini menjelaskan dasar teoritis, tujuan, dan metode yang digunakan untuk menghasilkan peta tutupan dan penggunaan lahan tahunan di Indonesia untuk periode 1990 hingga 2024 dalam MapBiomass Indonesia Koleksi 4.1. Di dalamnya diuraikan secara rinci mengenai bagaimana arsitektur pemrosesan citra, metode klasifikasi, pendekatan integrasi kelas dasar (*basic themes*) dan kelas tematik (*cross-cut themes*), serta metode penilaian akurasi yang digunakan. Penjelasan lebih spesifik mengenai prosedur yang diterapkan pada kelas tematik dapat dilihat pada lampiran.

1.2. Overview

Pengembangan setiap koleksi MapBiomass didukung oleh beberapa faktor utama, yaitu, 1. platform Google Earth Engine yang menyediakan akses data, kemampuan pemrosesan citra, algoritma standar, serta komputasi berbasis cloud, serta ketersediaan bebas data deret waktu Landsat; 2. jaringan kolaboratif MapBiomass yang melibatkan berbagai organisasi dan pakar untuk berbagi pengetahuan dan tools pemetaan; serta 3. dukungan lembaga pendanaan yang berperan penting dalam pengembangan inisiatif ini.

Sejak awal pengembangannya, pemetaan tutupan dan penggunaan lahan dalam MapBiomass Indonesia terus diperbarui dan disempurnakan setiap tahun, serta dikelompokkan ke dalam beberapa versi yang disebut Koleksi. Peta tahunan yang dihasilkan diproses menggunakan arsip citra satelit Landsat yang tersedia di platform Google Earth Engine, mencakup periode dari 1990 hingga saat ini. Perbandingan antar Koleksi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perkembangan koleksi MapBiomass Indonesia

Koleksi	Periode	Jumlah Kelas	Metode	Akurasi global*	Waktu rilis
Koleksi 1	2000-2019 (20 tahun)	2 level/11 kelas	Random Forest + U-net (Tambak)		November 2021
Koleksi 2	2000-2022 (23 tahun)	2 level/11 kelas	Random Forest	Level 1 Gb: 77,2%; All: 17,5%; Ar: 5,3% Level 2 Gb: 74,5%; All: 18,5%; Ar: 7.0%	Oktober 2022
Koleksi 3	2000-2023 (24 tahun)	2 level/13 kelas	Random Forest + DNN (Permukiman)		Desember 2023

Koleksi 4	1990-2024 (35 tahun)	2 level/13 kelas	Random Forest + U-net (sawit dan kebun kayu)		Agustus 2025
Koleksi 4.1	1990-2024 (35 tahun)	2 level/13 kelas	U-net (sawit dan kebun kayu)		Februari 2026

*Gb = global accuracy; Ar = area disagreement; and All = allocation disagreement.

Produk yang dihasilkan dalam MapBiomias Indonesia Koleksi 4.1 mencakup berbagai keluaran utama antara lain:

- Peta tutupan dan penggunaan lahan tahunan mencakup 13 kelas untuk periode 1990-2024
- Mosaik dengan variabel input (fitur) hasil prapemrosesan dari arsip citra Landsat 5, 7, 8, dan 9, Infrastruktur pemrosesan citra dan algoritma yang digunakan (script Google Earth Engine dan source code)
- Produk analisis turunan, seperti statistik dan analisis spasial perubahan tutupan lahan yang dikaitkan dengan batas administrasi, daerah aliran sungai, kawasan lindung, dan kategori penggunaan lahan lainnya.
- Penilaian kualitas mosaik Landsat juga disediakan untuk menunjukkan tingkat ketersediaan observasi bebas awan pada setiap piksel setiap tahun.
- Produk lainnya mencakup peta deforestasi tahunan dan kumulatif, peta vegetasi sekunder dan umur vegetasi sekunder (versi beta)
- Selain produk berbasis tutupan dan penggunaan lahan, MapBiomias Indonesia juga mengembangkan produk tematik lainnya, seperti MapBiomias Fire Koleksi 2 yang menyediakan peta tahunan dan bulanan bekas kebakaran dari tahun 2000 hingga 2024.

1.3. Cakupan Wilayah

MapBiomias berasal dari dua kata, yaitu “map” yang berarti peta dan “bioma”, yaitu wilayah geografis yang didefinisikan berdasarkan karakteristik vegetasi yang berkaitan dengan kondisi geomorfologi dan iklim, umumnya mencakup wilayah daratan yang luas. Berbeda dengan Brasil yang memiliki pembagian bioma yang jelas, Indonesia memiliki karakteristik sebagai negara kepulauan. Oleh karena itu, MapBiomias Indonesia dikembangkan untuk menghasilkan peta tahunan tutupan dan penggunaan lahan yang mencakup seluruh wilayah Indonesia tanpa menggunakan pendekatan bioma.

Sebagai gantinya, cakupan wilayah kerja ditentukan pada tingkat pulau besar atau kelompok pulau. Hasil pemetaan dari masing masing wilayah tersebut kemudian diintegrasikan menjadi satu peta nasional melalui tahap pascapemrosesan. Pendekatan ini memungkinkan konsistensi nasional sekaligus mempertahankan ketelitian analisis pada tingkat regional.

Secara teknis, wilayah kerja dibagi ke dalam tujuh region, yaitu (1) Sumatera, (2) Jawa Bali, (3) Nusa Tenggara, (4) Kalimantan, (5) Sulawesi, (6) Maluku, dan (7) Papua. Ketujuh region ini selanjutnya

dibagi menjadi 35 sub region. Pembagian ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi klasifikasi, karena setiap sub region memiliki karakteristik lanskap, tipe vegetasi, dan dinamika penggunaan lahan yang berbeda.

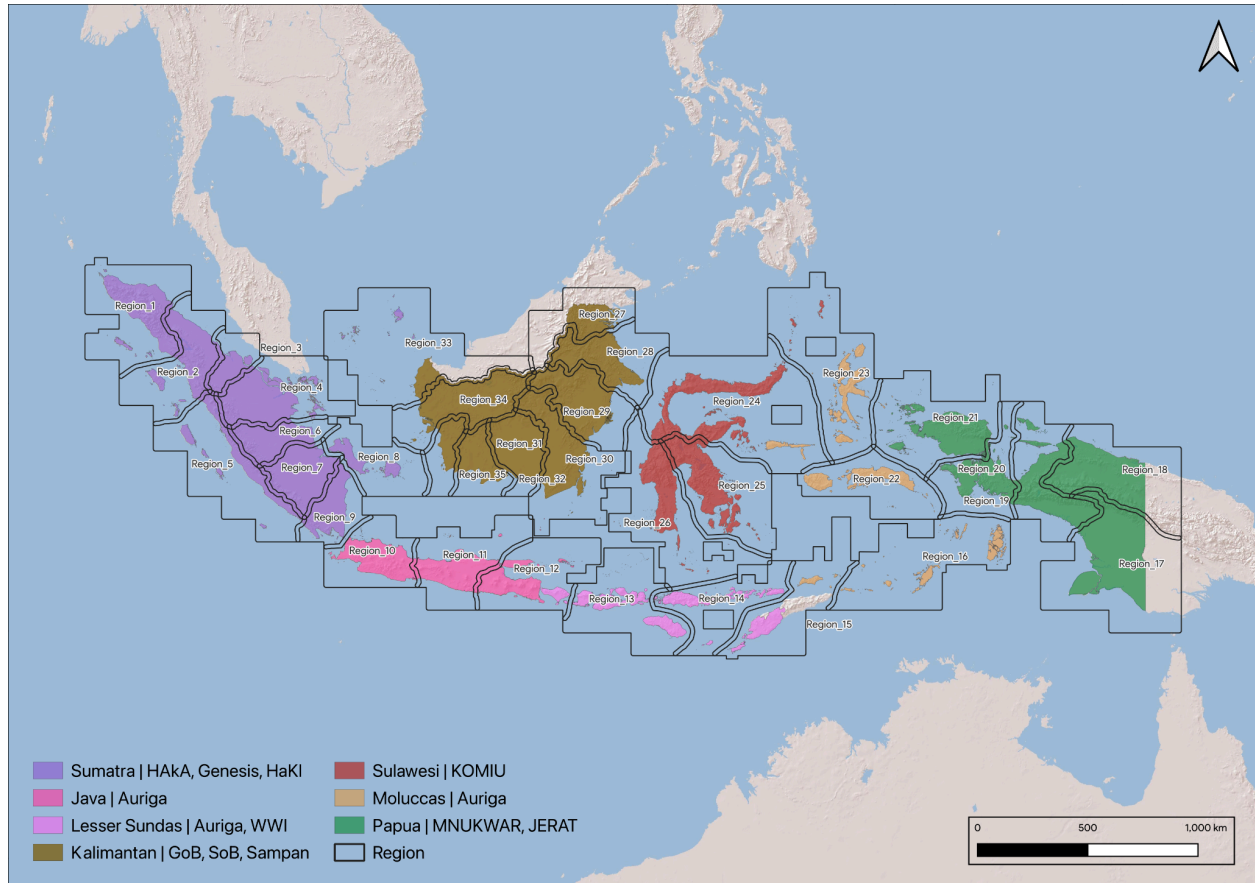
Selain pendekatan berbasis region, pemetaan juga dilakukan menggunakan pendekatan tema lintas sektor untuk meningkatkan kualitas hasil klasifikasi. Tema ini mencakup kawasan pesisir dan lahan basah (mangrove, tambak, dan hutan rawa gambut), sektor penggunaan lahan utama lainnya seperti pertanian (sawah, perkebunan kelapa sawit, dan kebun kayu) serta kelas tambang dan kawasan permukiman.

MapBiomass Indonesia menggunakan peta batas administrasi yang diterbitkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) dengan skala 1:250.000 sebagai dasar pembagian wilayah kerja. Selain itu, untuk memastikan wilayah pesisir terwakili secara utuh, diterapkan buffer sejauh 2 km ke arah laut dari garis pantai, sehingga area pesisir dan ekosistem terkait tidak terpotong dalam proses pemetaan.

Tabel 2. Karakteristik tutupan dan penggunaan lahan berdasarkan pulau

Region	Karakteristik biofisik utama	Karakteristik penggunaan lahan	Tekanan perubahan lahan utama	Implikasi terhadap pemetaan
Sumatra	Hutan hujan tropis dataran rendah, hutan pegunungan, dan hutan rawa gambut luas di bagian timur	Perkebunan kelapa sawit dan hutan tanaman industri mendominasi wilayah dataran rendah, serta pertanian lahan kering dan sawah	Ekspansi perkebunan skala besar, degradasi gambut, dan kebakaran lahan	Tingginya dinamika transisi dari hutan alam ke kelas antropogenik, serta potensi kebingungan spektral antara vegetasi alami sekunder dan perkebunan muda
Kalimantan	Tutupan hutan dataran rendah luas, hutan rawa, dan hutan rawa gambut	Perkebunan kelapa sawit, hutan tanaman industri, dan pertambangan, terutama di wilayah dataran rendah dan pesisir	Ekspansi perkebunan, pertambangan batubara, dan pembangunan infrastruktur	Pentingnya membedakan hutan alam, hutan tanaman, dan vegetasi terdegradasi, serta konsistensi temporal pada wilayah dengan pembukaan bertahap

Sulawesi	Topografi kompleks didominasi pegunungan dengan hutan terfragmentasi	Pertanian lahan kering campuran, perkebunan kakao dan kelapa, serta pertambangan nikel	Ekspansi pertanian rakyat dan pertambangan	Fragmentasi lanskap meningkatkan kompleksitas klasifikasi dan memerlukan pendekatan berbasis region untuk meningkatkan akurasi
Maluku	Hutan tropis relatif utuh pada pulau pulau besar, dengan topografi berbukit	Pertanian skala kecil seperti kelapa, pala, dan cengkeh	Ekspansi perkebunan dan pertambangan skala lokal	Stabilitas tutupan hutan relatif tinggi, namun mosaik pertanian tradisional dapat menimbulkan variasi spektral
Papua	Tutupan hutan alam sangat luas, termasuk hutan dataran rendah, rawa, dan pegunungan	Penggunaan lahan masih terbatas, dengan pertanian lokal dan ekspansi perkebunan di beberapa wilayah	Ekspansi perkebunan, pembangunan infrastruktur, dan pembukaan lahan baru	Wilayah referensi penting untuk kelas hutan alam, serta memerlukan perhatian pada deteksi awal perubahan
Jawa Bali	Lanskap sangat tertransformasi, dengan sisa hutan di wilayah pegunungan	Didominasi sawah, pertanian intensif, dan kawasan permukiman	Urbanisasi, intensifikasi pertanian, dan pembangunan infrastruktur	Kompleksitas tinggi akibat fragmentasi lahan dan ukuran patch kecil, memerlukan resolusi temporal yang konsisten
Nusa Tenggara	Didominasi savana, semak belukar, dan hutan musim dengan iklim kering	Pertanian lahan kering dan padang penggembalaan	Variabilitas iklim, kebakaran, dan tekanan penggembalaan	Dinamika musiman tinggi mempengaruhi respons spektral vegetasi, sehingga penting menggunakan metrik temporal



Gambar 1. Cakupan Wilayah dan Jaringan MapBiomass Indonesia

1.4. Aplikasi Utama

MapBiomass Indonesia dirancang sebagai platform *monitoring* dinamika tutupan dan penggunaan lahan yang dapat diaplikasikan untuk:

- a. memetakan dan mengukur transisi tutupan dan penggunaan lahan,
- b. penghitungan kehilangan dan penambahan hutan
- c. pemantauan sumber daya air dan interaksinya dengan kelas tutupan dan penggunaan lahan,
- d. memantau perluasan lahan pertanian dan tanaman industri,
- e. memantau perluasan infrastruktur,
- f. pemantauan kawasan lindung,
- g. pemantauan konsesi dan perizinan komoditas berbasis lahan, dan
- h. perencanaan penataan ruang dan wilayah.

2. Informasi Dasar and Latar Belakang

2.1. Jaringan MapBiomass Indonesia

MapBiomass adalah jaringan multi-lembaga yang terdiri dari universitas, organisasi masyarakat sipil, dan pengembang teknologi yang memiliki peran spesifik dalam pengembangan peta tutupan dan penggunaan lahan di berbagai wilayah. MapBiomass Indonesia diinisiasi oleh jejaring masyarakat sipil di Indonesia yang dikoordinir oleh Auriga Nusantara dengan dukungan kelembagaan dari Woods & Wayside International serta dukungan teknis dan teknologi dari MapBiomass Brasil. Di Indonesia terdapat sembilan organisasi masyarakat sipil yang berkontribusi dan berperan dalam koordinasi teknis regional, meliputi:

Sumatra:

- Hutan, Alam dan Lingkungan Aceh (HAKA) mencakup wilayah Sumatera Bagian Utara
- Hutan Kita Institute (HAKI) mencakup wilayah Sumatera Bagian Tengah
- Genesis mencakup wilayah Sumatera Bagian Selatan

Kalimantan:

- Sampan mencakup wilayah Kalimantan Barat
- Save Our Borneo (SOB) mencakup wilayah Kalimantan Tengah dan Kalimantan Selatan
- Green of Borneo (GoB) mencakup wilayah Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara

Sulawesi:

- Kompas Peduli Hutan (KOMIU) mencakup wilayah Sulawesi

Papua

- MNUKWAR mencakup wilayah Papua Barat,
- JERAT Papua mencakup wilayah Papua

Jawa-Bali-Nusra-Maluku dan tema lintas sektor:

- Auriga Nusantara
- Woods & Wayside International

Sejak Koleksi 2, jaringan MapBiomass Indonesia juga melibatkan 10 perguruan tinggi lokal dalam proses pengujian akurasi, meliputi Universitas Syiah Kuala-Aceh

- Universitas Syiah Kuala-Aceh
- Universitas Bengkulu
- Universitas Lampung
- Universitas Muhammadiyah Palangkaraya Kalimantan Tengah
- Universitas Mulawarman-Kalimantan Timur
- Universitas Tadulako-Sulawesi Tengah
- Universitas Papua
- Universitas Indonesia

- Universitas Gadjah Mada
- Institut Pertanian Bogor

MapBiomass Indonesia juga memiliki Komite Penasihat Ilmiah independen (Scientific Advisory Committee, SAC), yang saat ini terdiri dari:

- Prof. Projo Danoedoro - Universitas Gadjah Mada
- Dr. Arief Darmawan - Universitas Lampung
- Dr. Nur Hygiawawti Rahayu - BAPPENAS
- Dr. Hasriani Muis - Universitas Tadulako
- Francina Frenshegty Kesaulija - Universitas Papua

2.2. Data Penginderaan Jauh

Dataset citra yang digunakan oleh MapBiomass Indonesia dari Koleksi 1 hingga Koleksi 4 diperoleh dari sensor Landsat Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), serta Operational Land Imager dan Thermal Infrared Sensor (OLI-TIRS), yang masing masing terpasang pada satelit Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, dan Landsat 9. Seluruh koleksi citra Landsat dengan resolusi spasial 30 meter ini dapat diakses melalui platform Google Earth Engine dan diproduksi oleh NASA dan USGS: ee.ImageCollection("LANDSAT/LT04/C02/T1_L2").

Pada koleksi 1 dan 2, MapBiomass Indonesia menggunakan data reflektansi top of atmosphere (TOA) dari USGS Collection 1 Tier 1. Sejak Koleksi 3, mosaik Landsat baru diproses menggunakan data dataset USGS Landsat Collection 2 (Tier 1). Dataset ini termasuk dalam kategori Tier 1, yang berarti telah melalui proses kalibrasi radiometrik, ortorektifikasi menggunakan ground control points dan model elevasi digital, sehingga menjamin ketelitian posisi piksel serta koreksi atmosfer yang memadai.

2.3. Google Earth Engine dan MapBiomass

Google Earth Engine (GEE) adalah platform komputasi berbasis cloud yang dikembangkan oleh Google untuk analisis dan visualisasi data geospasial dalam skala besar. Keunggulan utama platform ini terletak pada kemampuannya memproses volume data satelit dan informasi geografis yang sangat besar tanpa memerlukan infrastruktur komputasi lokal yang kompleks, karena seluruh proses dilakukan melalui sistem cloud. Melalui Application Programming Interface (API) berbasis JavaScript dan Python, GEE memungkinkan pengguna mengembangkan aplikasi dan analisis khusus sesuai kebutuhan, sementara fitur visualisasinya menyediakan lingkungan yang kuat untuk eksplorasi dan interpretasi data spasial.

Inisiatif MapBiomass menggunakan Google Earth Engine sebagai platform teknologi utama untuk pemrosesan dan analisis data penginderaan jauh. Dengan akses ke arsip citra satelit historis dan terkini, platform ini memungkinkan pelaksanaan analisis temporal secara rinci terhadap dinamika tutupan dan penggunaan lahan. Sistem komputasi berbasis cloud memungkinkan pengelolaan data dalam volume besar secara efisien serta menghasilkan peta dengan resolusi tinggi yang merepresentasikan perubahan lanskap secara konsisten dari waktu ke waktu.

Selain itu, tim MapBiomass mengembangkan algoritma klasifikasi khusus yang dijalankan secara otomatis melalui API Google Earth Engine untuk mengidentifikasi dan memetakan berbagai kelas tutupan lahan. Proses ini memungkinkan pembaruan peta secara berkala dengan tingkat konsistensi dan akurasi yang tinggi. Hasil pemetaan dapat divisualisasikan secara interaktif dan dibagikan kepada publik, yang memperkuat prinsip transparansi, kolaborasi, dan keterbukaan data yang menjadi dasar pelaksanaan MapBiomass.

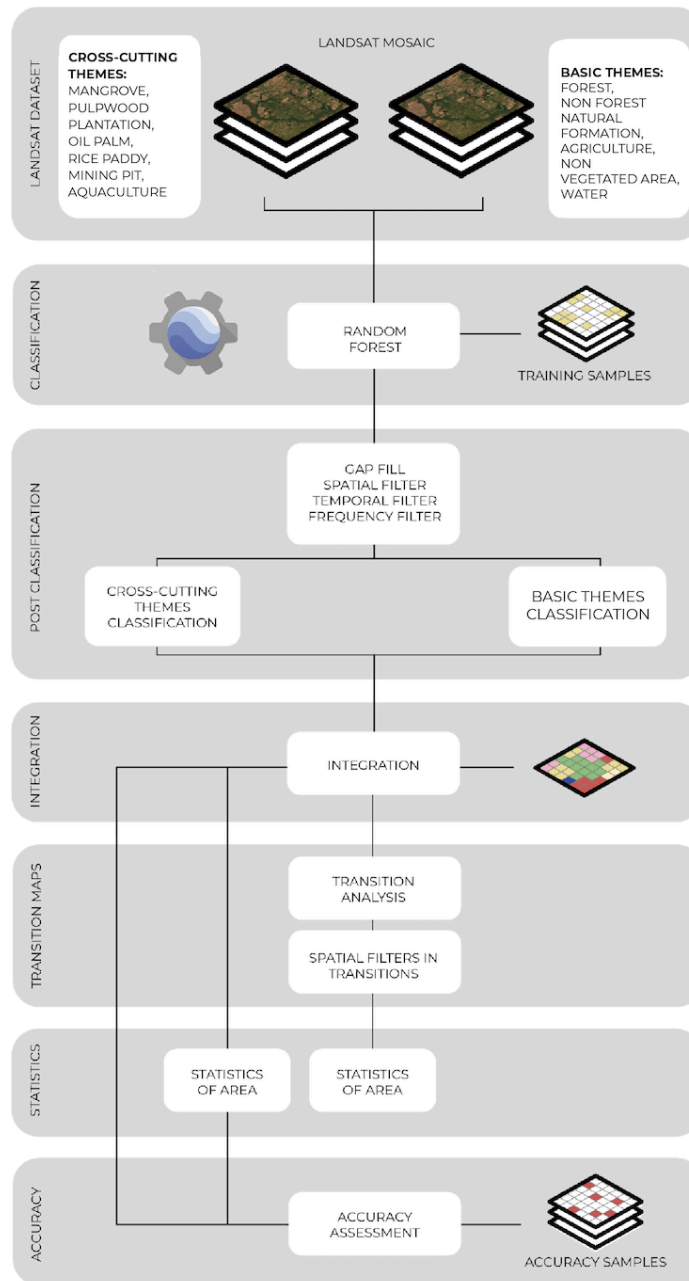
3. Metodologi MapBiomass Indonesia

3.1. Deskripsi Metodologi

Peta tutupan dan penggunaan lahan MapBiomass Koleksi 4.1 dihasilkan melalui beberapa tahapan utama yang disajikan pada Gambar 2. Tahap pertama adalah penyusunan mosaik citra Landsat tahunan menggunakan jendela waktu tertentu yang dirancang untuk mengoptimalkan kontras spektral, sehingga berbagai kelas tutupan dan penggunaan lahan dapat dibedakan dengan lebih jelas sesuai karakteristik masing-masing wilayah dan tema.

Tahap berikutnya adalah penyusunan variabel input (feature space) yang diperoleh dari berbagai atribut spektral dari band Landsat. Atribut ini digunakan untuk melatih model klasifikasi Random Forest setiap tahun, berdasarkan sampel pelatihan (training samples) yang dikumpulkan secara khusus sesuai ketersediaan data dan kebutuhan statistik. Hasil proses ini adalah peta tutupan dan penggunaan lahan tahunan untuk seluruh wilayah studi. Untuk beberapa kelas spesifik seperti sawit dan kebun kayu identifikasi dilakukan menggunakan model deep learning U Net.

Setelah klasifikasi awal, dilakukan penerapan filter spasial dan temporal untuk mengurangi noise dan meningkatkan konsistensi antar tahun. Peta hasil klasifikasi dari berbagai wilayah dan tema kemudian diintegrasikan secara hierarkis menggunakan aturan prioritas berbasis pengetahuan ahli. Proses filtering kembali dilakukan pada peta hasil integrasi untuk menghasilkan produk akhir. Tahap terakhir adalah evaluasi akurasi menggunakan sebanyak 12.957 sampel validasi independen per tahun untuk periode 2000 sampai 2022. Analisis ini mengikuti standar praktik internasional dan digunakan untuk mengukur tingkat keandalan peta. Selain itu, dari peta tahunan tersebut juga dihasilkan berbagai analisis statistik, termasuk perubahan antar kelas dan distribusi spasialnya pada berbagai unit wilayah seperti provinsi, kabupaten, dan kategori wilayah lainnya.



Gambar 2. Tahapan umum implementasi algoritma MapBiomass pada Google Earth Engine

3.2. Landsat Mosaics

Mosaik Landsat merupakan kompilasi citra Landsat tahunan periode 1990 sampai 2024 yang digunakan sebagai dasar utama pemetaan tutupan lahan. Tujuan utama penyusunan mosaik ini adalah menghasilkan komposit citra tahunan yang mencakup musim kemarau dan musim hujan.

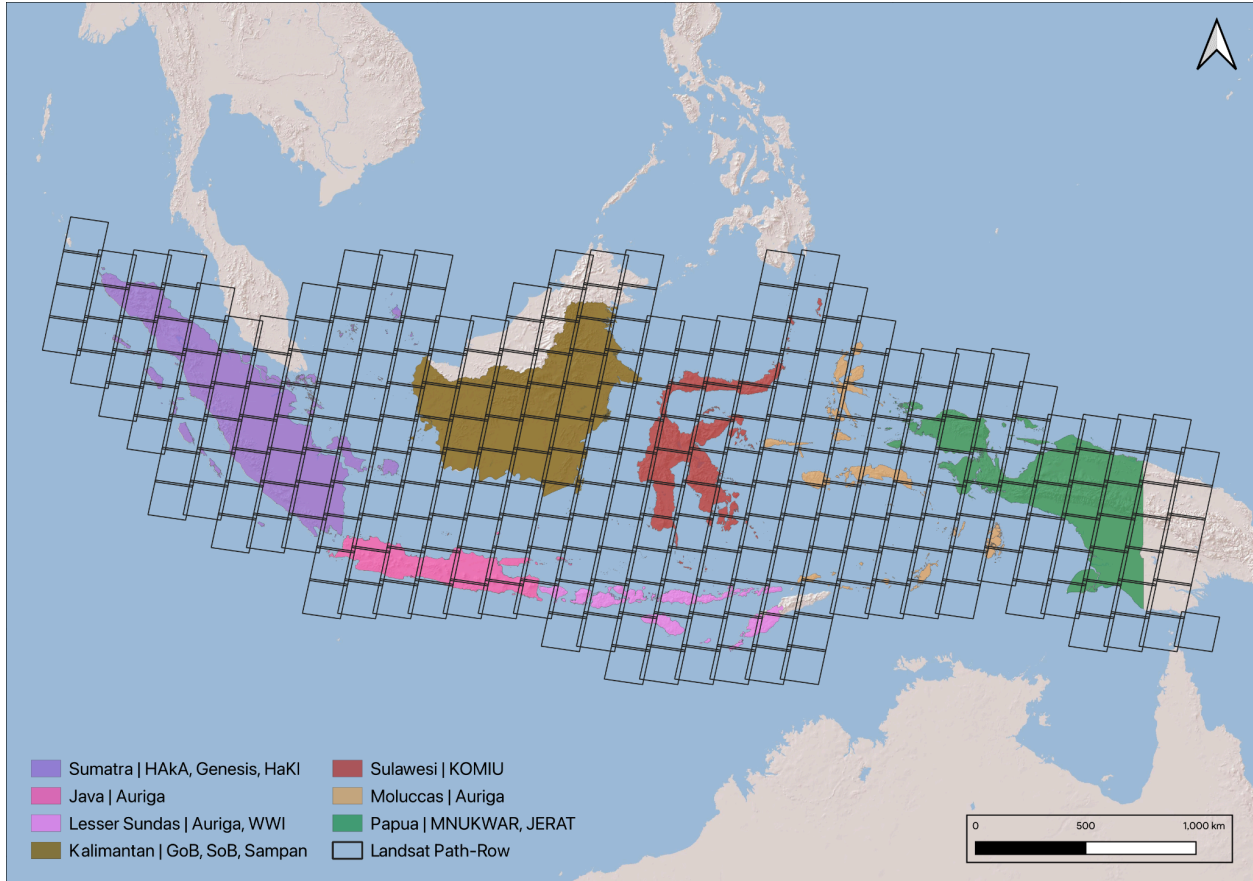
Pendekatan ini memungkinkan peningkatan kontras spektral antara kelas hutan dan non hutan, mengurangi gangguan awan, serta memastikan penggunaan citra paling representatif untuk setiap tahun. Dengan demikian, mosaik tahunan tersebut mampu merekam dinamika perubahan tutupan lahan secara konsisten dari waktu ke waktu.

Dalam proses penyusunan mosaik, unit referensi spasial yang digunakan adalah sistem Worldwide Reference System 2 (WRS 2), yaitu sistem grid yang digunakan oleh satelit Landsat untuk mengorganisasi cakupan citra berdasarkan path dan row. Setiap kombinasi path-rows merepresentasikan area sekitar 183×170 kilometer atau sekitar 31.110 kilometer persegi. Sistem ini digunakan secara konsisten pada seluruh sensor Landsat 5, 7, 8, dan 9, sehingga memungkinkan integrasi data multi sensor dalam satu seri waktu yang harmonis.

Penggunaan unit path-rows sebagai dasar pemrosesan mosaik memastikan konsistensi spasial antar tahun dan antar sensor, serta memudahkan pengelolaan data dalam skala nasional maupun regional. Pendekatan ini menjadi fondasi penting dalam menghasilkan mosaik tahunan yang stabil, akurat, dan dapat digunakan untuk analisis perubahan tutupan dan penggunaan lahan jangka panjang.

Tabel 3. Jumlah path-rows per region

Region	Jumlah path-row	Mosaik total (x35 tahun)
Sumatra	51	1.785
Kalimantan	44	1.540
Sulawesi	21	735
Maluku	38	1.330
Papua	41	1.435
Jawa-Bali	19	665
Nusa Tenggara	23	805
Total	237	8.295



Gambar 3. Cakupan scene Landsat (path-rows) di Indonesia

Dalam proses pembuatan mosaik Landsat di MapBiomass, nilai median digunakan untuk memilih nilai piksel yang paling representatif dari sekumpulan citra dalam satu periode waktu. Setiap lokasi piksel biasanya memiliki beberapa nilai dari tanggal perekaman yang berbeda. Nilai yang terlalu tinggi sering disebabkan oleh awan, sedangkan nilai yang terlalu rendah biasanya berasal dari bayangan awan atau gangguan atmosfer. Median dipilih karena berada di tengah distribusi nilai, sehingga tidak terpengaruh oleh nilai ekstrem tersebut.

Secara teknis, prosesnya berlangsung sebagai berikut. Pertama, beberapa citra Landsat dikumpulkan dalam periode tertentu, misalnya satu tahun atau musim tertentu. Kedua, piksel yang teridentifikasi sebagai awan atau bayangan dihapus menggunakan band Quality Assessment. Ketiga, dari seluruh nilai piksel yang tersisa pada lokasi yang sama, sistem menghitung nilai median untuk setiap band spektral. Nilai median ini kemudian digunakan sebagai nilai akhir pada mosaik.

Untuk mengurangi noise dan meningkatkan kualitas mosaik, dikembangkan suatu tools untuk mengevaluasi setiap citra secara individual dan mengeluarkan citra yang tidak informatif, misalnya yang memiliki tutupan awan berlebih. Pendekatan ini meningkatkan kualitas mosaik karena menghasilkan citra yang relatif bebas awan, stabil secara radiometrik, dan konsisten antar waktu.

Hal ini sangat penting untuk klasifikasi tutupan lahan menggunakan algoritma seperti Random Forest, karena kualitas input sangat menentukan akurasi hasil klasifikasi.

3.3. Feature Space (Variabel Input)

Variabel dalam feature space dihitung dari mosaik median tahunan dan digunakan sebagai input dalam proses klasifikasi. Seluruh band Landsat beserta variabel turunan dikompilasi ke dalam file raster dengan total 156 band. Komponen ini mencakup band spektral Landsat, berbagai indeks spektral, informasi fraksi dan tekstur yang diturunkan dari band tersebut, serta indeks berbasis fraksi spektral.

Untuk menghasilkan nilai setiap piksel per tahun, diterapkan sejumlah statistical reducers terhadap kumpulan citra yang tersedia. Reducer ini menangkap dinamika spektral tahunan maupun musiman, sehingga memperkaya representasi karakteristik tiap kelas tutupan dan penggunaan lahan.

Reducer yang digunakan meliputi:

- Median: Nilai median dari seluruh piksel yang tersedia dalam mosaik tahunan pada suatu lokasi.
- Dry season median: Median statistik yang dihitung dari piksel pada kuartil ke 25 NDVI, yaitu nilai NDVI terendah, yang merepresentasikan musim kering.
- Wet season median: Median statistik yang dihitung dari piksel pada kuartil ke 75 NDVI, yaitu nilai NDVI tertinggi, yang merepresentasikan musim basah.
- Amplitude: Rentang variasi antara nilai maksimum dan minimum dari seluruh piksel dalam mosaik tahunan.
- Standard deviation: Simpangan baku dari seluruh nilai piksel yang tersedia dalam mosaik tahunan pada suatu lokasi.
- Minimum: Nilai terendah dari seluruh piksel dalam mosaik tahunan pada lokasi tertentu.
- Maximum: Nilai tertinggi dari seluruh piksel dalam mosaik tahunan pada lokasi tertentu.

Kombinasi band asli, indeks, fraksi, tekstur, variabel topografis, serta berbagai reducer statistik ini membentuk feature space multidimensi yang memungkinkan algoritma klasifikasi membedakan kelas tutupan dan penggunaan lahan secara lebih presisi dalam analisis deret waktu tahunan. a yang umum digunakan dalam pemetaan berbasis Landsat.

Tabel 4. Daftar, Deskripsi, dan Referensi Band, Fraksi, dan Indeks pada Feature Space

	Name	Formula	Statistical Reducer			
			median	median_dry	median_wet	stdDev
Band	blue	B1 (L5-L7); B2 (L8)				
	green	B1 (L5-L7); B3 (L8)				
	red	B1 (L5-L7); B4 (L8)				
	nir	B1 (L5-L7); B5 (L8)				

	swir1	B1 (L5-L7); B6 (L8)				
	swir2	B7 (L5); B8 (L7); B7 (L8)				
Index	ndvi	$(nir - red)/(nir+red)$				
	evi	$2.5 * ((nir - red) / ((nir + (6 * red)) - (7.5 * blue) + 1))$				
	evi2	$(2.5*(nir-red))/(nir+2.4*red+1)$				
	cai	$(swir2/swir1)$				
	ndwi	$(nir-swir1)/(nir+swir1)$				
	gcvi	$(nir/green-1)$				
	pri	$(blue-green/(blue+green))$				
	savi	$(1+L)*(nir-red)/(nir+red+0,5)$				
	ndsi	$(swir1 - nir) / (swir1 + nir)$				
	mmri	$((green - swir1) / (green + swir1)) - abs((nir - red)/(nir + red)) / (abs((green - swir1) / (green + swir1)) + abs((nir - red)/(nir + red)))$				
	ndbi	$(swir1 - nir)/(swir1 + nir)$				
	nbr	$(nir-swir2)/(nir+swir2)$				
	tgi	$(120*(red-blue)-(190*(red-green)))$				
	total nitrate	$(2.71828**((a - b * (c / (green + red + blue))))$				
	nir_entropy					
	green_entropy					
nir_contrast						
nir_correlation						
Fraction	gv	<i>Fractional abundance of green vegetation within the pixel</i>				
	npv	<i>Fractional abundance of non-photosynthetic vegetation within the pixel</i>				
	soil	<i>Fractional abundance of soil within the pixel</i>				
	cloud	<i>Fractional abundance of cloud within the pixel</i>				
	shade	$100-(gv+npv+soil+cloud)$				
MEM Index	gvs	$gv/(gv+npv+soil+cloud)$				
	ndfi	$(gvs-(npv+soil))/(gvs+(npv+soil))$				
	sefi	$((gv+npv_s-soil)/(gv+npv_s+soil))$				

	wefi	$((gv+npv)-(soil+shade))/((gv+npv)+(soil+shade))$				
	fns	$((gn+shade)-soil)/((gv+shade)+soil)$				
Slope		ALOS DSM: GLobal 30m				

3.4. Klasifikasi

3.4.1. Sistem klasifikasi

Tutupan lahan mengacu pada hamparan objek yang menutupi permukaan bumi, sedangkan penggunaan lahan berkaitan dengan interaksi manusia dengan lahan atau jenis kegiatan yang terjadi di permukaan bumi (antropogenik). Sistem klasifikasi merupakan representasi konseptual yang memuat nama kelas, kode, definisi, serta kriteria diagnostik yang jelas untuk membedakan berbagai jenis tutupan dan penggunaan lahan [12]. Sistem ini juga menjelaskan hubungan antar kelas sehingga membentuk struktur yang terorganisasi dan konsisten. Melalui sistem klasifikasi, kondisi nyata yang kompleks di lapangan disederhanakan menjadi sejumlah kelas yang terdefinisi dengan baik, sehingga dapat mewakili variasi tutupan dan penggunaan lahan secara akurat namun tetap operasional untuk proses pemetaan dan analisis spasial.

3.4.2. Legenda

MapBiomass Indonesia mengadopsi konsep klasifikasi tutupan dan penggunaan lahan dari Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa Bangsa atau Food and Agriculture Organization of the United Nations, yang menerapkan struktur hierarkis untuk mengakomodasi berbagai tingkat kategori. Struktur ini dimulai dari kelas dengan kategori umum, kemudian dibagi secara sistematis menjadi subkelas yang lebih rinci [13]. Pendekatan hierarkis tersebut memungkinkan fleksibilitas dalam analisis, baik pada skala agregat maupun detail, sesuai kebutuhan pengguna data.

Kategorisasi dalam sistem ini dapat dirancang berdasarkan satu atau lebih karakteristik, seperti respons spektral dan tekstur citra penginderaan jauh [14]. Dengan pendekatan tersebut, setiap kelas dibedakan menggunakan kriteria diagnostik yang konsisten dan terukur.

Sistem klasifikasi MapBiomass Indonesia Koleksi 3 terdiri atas dua tingkat (level) kategori. Level 1 mencakup lima kelas utama, yaitu hutan, vegetasi alami non hutan, pertanian, non vegetasi, dan perairan. Level 2 terdiri atas 13 kelas yang merupakan turunan atau subkelas dari lima kelas utama tersebut, sehingga memberikan representasi yang lebih rinci terhadap variasi tutupan dan penggunaan lahan di Indonesia.

Tabel 5. Kelas Tutupan dan Penggunaan Lahan MapBiomass Indonesia Koleksi 4.1

Natural/Anthropic	EN	ID	pixel id	Hexadecimal code	Color	Level
	1. Forest	1. Hutan	1	#1f8d49		1

Natural	1.1. Forest Formation	1.1. Formasi Hutan	3	#1f8d49		2
Natural	1.2. Mangrove	1.2. Mangrove	5	#04381d		2
Natural	1.3 Peat swamp forest	1.3 Hutan rawa gambut	76	#2f7360		2
	2. Non-Forest Natural Formation	2. Tumbuhan Non-Hutan	10	#d6bc74		1
Natural	2.1. Other Natural Vegetation	2.1. Tumbuhan Non-Hutan Lainnya	13	#d89f5c		2
	3. Agriculture	3. Pertanian	18	#E974ED		1
Anthropic	3.1. Rice Paddy	3.1. Sawah	40	#c71585		2
Anthropic	3.2. Oil Palm	3.2. Sawit	35	#9065d0		2
Anthropic	3.3. Pulpwood Plantation	3.3. Kebun Kayu	9	#7a5900		2
Anthropic	3.4. Other Agriculture	3.4. Pertanian Lainnya	21	#ffefc3		2
	4. Non-Vegetated Area	4. Non-Vegetasi	22	#d4271e		1
Anthropic	4.1. Mining Pit	4.1. Lubang Tambang	30	#9c0027		2
Anthropic	4.2. Urban Area	4.2. Permukiman	24	#d4271e		2
Natural	4.3. Other Non-Vegetation	4.3. Non-Vegetasi Lainnya	25	#db4d4f		2
	5. Water Body	5. Tubuh Air	26	#2532e4		1
Anthropic	5.1. Aquaculture	5.1. Tambak	31	#091077		2
Natural	5.2. River, Lake, Ocean	5.2. Sungai, Danau, Laut	33	#2532e4		2
Not defined	6. Not observed	6. Citra Tertutup Awan	27	#ffffff		1

Koleksi 4.1 membagi kelas tutupan dan penggunaan lahan ke dalam 13 kelas. Struktur ini terdiri atas lima kelas dasar (basic theme), yaitu formasi hutan, tumbuhan nonhutan, pertanian lainnya, nonvegetasi lainnya, serta sungai, danau, dan laut. Sementara kelas lainnya merupakan kelas lintas tema (cross-cut theme), meliputi mangrove, hutan rawa gambut, sawah, sawit, kebun kayu, lubang tambang, permukiman, dan tambak.

Kelas dasar merupakan kelas yang didominasi oleh karakteristik alami atau memiliki struktur umum pada level hierarki yang lebih tinggi. Pemetaan kelas dasar dilakukan per region, mencakup wilayah Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Papua, serta Jawa, Bali, Nusa Tenggara, dan Maluku. Pendekatan ini mempertimbangkan perbedaan kondisi biofisik dan dinamika lanskap di masing-masing wilayah.

Sebaliknya, kelas lintas tema mencerminkan tutupan dan penggunaan lahan yang cenderung dinamis, bersifat antropogenik, atau memerlukan pendekatan khusus dalam proses identifikasi dan pemetaannya. Kelas kelas ini umumnya memiliki pola spektral yang lebih kompleks atau berubah secara cepat akibat aktivitas manusia. Tahapan pemetaan kelas tematik dijelaskan secara lebih rinci dalam lampiran, termasuk metodologi, variabel pendukung, serta strategi klasifikasi yang digunakan.

3.4.3. Training Samples

Proses klasifikasi tutupan lahan diawali dengan pemahaman yang jelas terhadap variabilitas spektral setiap kelas. Tahap ini penting untuk memastikan bahwa pengumpulan sampel pelatihan dilakukan secara tepat. Sampel yang digunakan terdiri atas piksel yang tetap stabil dalam kelas yang sama sepanjang deret waktu koleksi sebelumnya (stable samples). Dengan kata lain, respons spektralnya merepresentasikan tipe tutupan yang sama selama seluruh periode tersebut.

Untuk itu, algoritma terlebih dahulu mengidentifikasi piksel stabil pada area yang dipilih. Dari layer tersebut kemudian dihasilkan titik acak yang diseimbangkan berdasarkan luas spasial masing masing kelas. Jumlah titik per kelas ditentukan oleh interpreter, dan lokasi setiap titik digunakan sebagai input untuk melatih pengklasifikasi Random Forest.

Secara opsional, interpreter dapat mengecualikan kelas yang dianggap tidak stabil secara temporal karena berpotensi menimbulkan noise pada klasifikasi awal. Selain itu, tersedia opsi untuk memasukkan kelas tertentu dalam alokasi titik pada piksel stabil atau memodifikasi sampel secara manual, baik dengan menghapus maupun menambahkan lokasi berdasarkan evaluasi kestabilan temporalnya (complementary samples).

Evaluasi kestabilan dilakukan dengan membandingkan respons spektral piksel yang sama pada seluruh mosaik dalam deret waktu yang memiliki data untuk piksel tersebut. Pendekatan ini memberikan dasar untuk pemilihan sampel pelengkap melalui jendela multitemporal, sehingga dataset tranining sample dapat disempurnakan dan akurasi klasifikasi meningkat. Proses ini dilaksanakan menggunakan alat pembuatan geometri yang tersedia di Google Earth Engine.

3.4.4. Random Forest

Random Forest [23] adalah algoritma machine learning yang dipilih oleh MapBiomass Indonesia sebagai *classifier* untuk kelas dasar. Random forest classifier berisi sejumlah decision tree atas parameter yang ditentukan untuk mempelajari karakteristik atau pola dari sampel yang diberikan. Random forest mempertimbangkan keputusan dari decision tree berdasarkan pilihan mayoritas untuk memprediksi data yang dianalisis dalam proses klasifikasi.

Random Forest adalah adalah algoritma machine learning, berbasis pendekatan supervised learning. Metode ini merupakan salah satu algoritma machine learning yang terintegrasi dalam platform geomatika Google Earth Engine. Algoritma ini bekerja dengan membangun dan menggabungkan sejumlah pohon keputusan (decision tree) yang dihasilkan dari data pelatihan.

Pada setiap node pohon, dipilih secara acak sebagian variabel prediktor, kemudian ditentukan pemisahan optimal yang paling baik membedakan data. Setiap pohon memberikan satu suara untuk mengklasifikasikan suatu elemen, dan kelas akhir ditentukan berdasarkan suara mayoritas. Dalam konteks citra satelit, setiap piksel diberi kelas berdasarkan hasil voting yang paling sering muncul. Pendekatan ensemble learning ini terbukti memiliki tingkat akurasi dan ketahanan yang tinggi, termasuk pada kondisi dengan variabilitas dan noise data yang besar.

Untuk konfigurasi yang tepat, pengguna perlu menentukan parameter utama seperti jumlah pohon atau $nTrees$, jumlah variabel acak yang dipertimbangkan pada setiap node atau $mTry$, serta kumpulan variabel prediktor yang digunakan sebagai input. Pada koleksi 4.1 jumlah pohon per region berkisar antara 50 hingga 100. Variabel yang digunakan berasal dari mosaik tahunan serta data pelatihan yang dihasilkan dari proses identifikasi sampel.

3.4.5. Klasifikasi

MapBiomass Indonesia menerapkan pendekatan klasifikasi terbimbing untuk menghasilkan data tutupan dan penggunaan lahan. Klasifikasi terbimbing merupakan teknik yang membagi domain spektral ke dalam wilayah wilayah yang dapat dikaitkan dengan kelas penutup lahan tertentu sesuai kebutuhan aplikasi [21]. Pendekatan ini memerlukan sampel referensi yang telah diklasifikasikan sebelumnya untuk melatih pengklasifikasi, yang kemudian digunakan untuk mengklasifikasikan data dengan kelas yang belum diketahui [22].

Sampel dianalisis menggunakan algoritma Random Forest dengan mempertimbangkan variabel yang telah ditetapkan sebagai parameter spektral. Proses klasifikasi dijalankan pada platform Google Earth Engine dan dilakukan untuk setiap tahun pada masing masing region. Hasil klasifikasi selanjutnya diperiksa dan dievaluasi, termasuk melalui penyesuaian sampel pada setiap kelas, hingga diperoleh hasil yang dinilai paling representatif sebagai klasifikasi akhir.

Pada Koleksi 4.1, Random Forest juga digunakan untuk klasifikasi lintas tema seperti mangrove, hutan rawa gambut, sawah, permukiman, tambang, dan tambak. Sementara itu, untuk kelas kebun kayu dan sawit digunakan metode klasifikasi berbasis deep learning U Net. Penjelasan lebih rinci mengenai metode U Net disajikan dalam lampiran.

3.4.6. Pascaklasifikasi

Prosedur pascaklasifikasi diterapkan pada hasil klasifikasi tutupan dan penggunaan lahan untuk memperbaiki kesalahan yang masih muncul. Karena metode yang digunakan berbasis piksel dan mencakup periode waktu yang panjang, hasil klasifikasi dapat mengandung bias spasial maupun temporal. Kesalahan tersebut umumnya disebabkan oleh bayangan awan yang tersisa, bagian citra yang kosong karena celah pada mosaik Landsat, serta piksel kecil yang tersebar acak.

Untuk memperbaiki konsistensi klasifikasi tutupan dan penggunaan lahan dari tahun ke tahun, diterapkan serangkaian filter pascaklasifikasi sebagai berikut:

- a. Gap fill, digunakan untuk mengisi kekosongan data dengan memanfaatkan informasi dari waktu terdekat yang tersedia.
- b. Filter temporal, digunakan untuk memastikan konsistensi perubahan kelas antar tahun sehingga mengurangi transisi yang tidak logis secara waktu.
- c. Filter frekuensi, diterapkan untuk mengevaluasi dominasi kemunculan suatu kelas dalam periode tertentu sehingga membantu mengoreksi klasifikasi yang tidak stabil.
- d. Filter spasial, bertujuan mengurangi piksel terisolasi dan memperhalus pola spasial kelas pada peta.

Seluruh proses pasca klasifikasi ini diimplementasikan menggunakan Google Earth Engine.

3.4.6.1. Gap Fill

Gap fill digunakan untuk mengisi data yang kosong pada hasil klasifikasi. Dalam deret waktu yang panjang, beberapa tahun dapat memiliki kekosongan data akibat tutupan awan. Kekosongan tersebut diisi menggunakan hasil klasifikasi dari tahun terdekat. Sistem terlebih dahulu mencari data dari tahun sebelumnya yang paling dekat. Jika tidak tersedia, maka digunakan data dari tahun sesudahnya yang paling dekat secara waktu.

Tujuan dari filter Gap Fill adalah untuk mengisi ruang kosong pada mosaik yang terjadi karena tidak tersedianya informasi dalam rentang waktu tertentu. Filter ini penting karena pada beberapa tahun atau wilayah tertentu tidak tersedia citra dengan kualitas yang memadai. Pada Mosaik Landsat, terdapat periode ketika beberapa tahun berturut turut tidak memiliki data citra, atau muncul area kosong akibat proses penghapusan awan saat pengolahan citra.

Untuk mengatasi kondisi tersebut, algoritma yang digunakan akan mendeteksi area yang tidak memiliki informasi pada mosaik. Berdasarkan deret waktu yang tersedia, celah tersebut diisi menggunakan data dari tahun sebelumnya yang paling dekat. Jika tidak tersedia, maka algoritma akan menggunakan data yang paling dekat dari tahun sesudahnya. Proses ini dilakukan sampai ditemukan data yang valid.

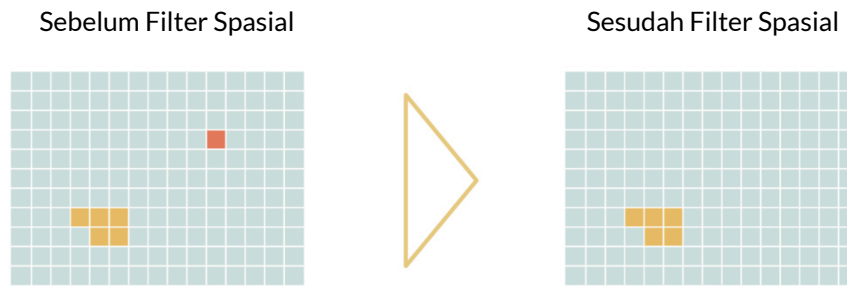
Sebelum filter ini diterapkan, deret waktu pada tahun tahun sebelumnya harus diperiksa dengan cermat. Hal ini penting karena algoritma dapat saja mengisi kekosongan dengan data yang kurang sesuai, sehingga berpotensi menampilkan kelas yang berbeda dari kondisi sebenarnya di lokasi kajian.

Meskipun filter ini membantu mengurangi dampak kekosongan data dan membuat deret waktu lebih stabil, metode ini memiliki keterbatasan. Perubahan yang benar benar terjadi pada tahun yang diisi tidak dapat terdeteksi. Perubahan tersebut baru akan terlihat pada tahun berikutnya ketika data yang valid tersedia. Akibatnya, pemetaan perubahan tutupan lahan dapat terpengaruh pada area yang mengalami proses pengisian.

3.4.6.2. Filter Spasial

Filter spasial adalah fungsi yang digunakan untuk memperbaiki kualitas hasil klasifikasi dengan mengoreksi piksel yang terisolasi atau berbeda dari kelompok piksel di sekitarnya. Dengan filter ini, kesalahan seperti bayangan atau sisa kelas tutupan lain yang tidak sesuai dapat dikurangi. Selain itu, filter ini membantu memperjelas atau menyederhanakan detail tertentu pada mosaik.

Dalam penerapannya, digunakan batas minimum luas sebesar 0,5 hektare, setara dengan 5 piksel yang saling terhubung. Piksel harus terkoneksi satu sama lain agar dianggap sebagai kelompok yang mewakili suatu kelas. Jika terdapat piksel yang tidak memenuhi kriteria keterhubungan tersebut, maka piksel tersebut dianggap terisolasi dan akan disesuaikan.



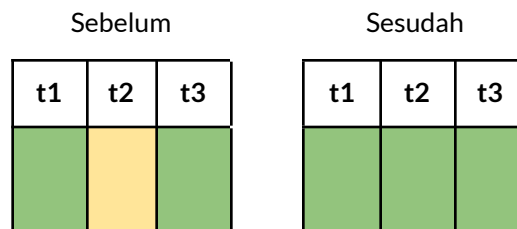
Gambar 4. Ilustrasi mekanisme filter spasial

Sebagai contoh, pada pada gambar awal, terdapat 1 piksel terisolasi. Setelah filter spasial diterapkan, piksel tersebut diganti mengikuti kelas yang paling dominan di sekitarnya karena tidak terhubung dengan kelompok piksel lainnya. Hasil akhirnya, piksel tersebut berubah kelas menjadi sesuai dengan kelas yang dominan di area sekitarnya.

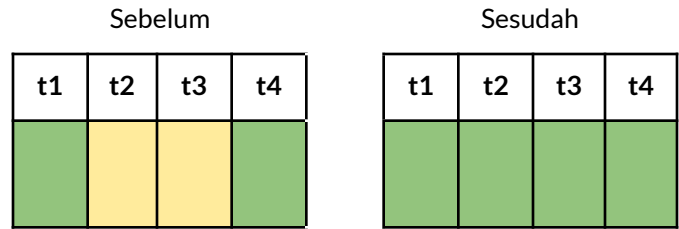
3.4.6.3. Filter Temporal

Filter temporal digunakan untuk memperbaiki piksel yang teridentifikasi sebagai noise akibat ketidakkonsistenan dalam klasifikasi tutupan lahan karena perubahan tahunan yang bertahap atau kekurangan/distorsi informasi pada mosaik. Filter ini terdiri dari tiga jenis, yaitu untuk tahun menengah, tahun pertama, dan tahun terakhir.

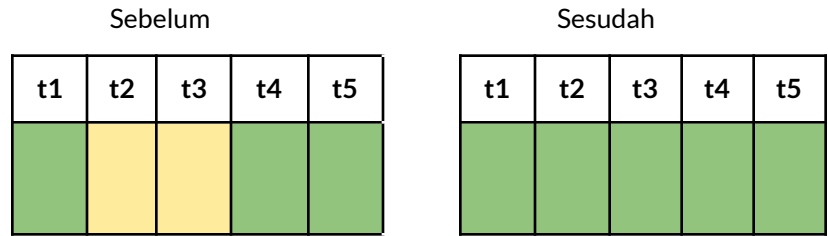
Filter temporal untuk tahun tengah bekerja dengan membandingkan piksel pada awal dan akhir rangkaian waktu, lalu menyesuaikan klasifikasi piksel di tahun-tahun tengah (misal 1990-2024). Contohnya, untuk aturan 3-tahun, sebuah piksel yang diklasifikasikan sebagai hutan (hijau) di t1 dan t3 tapi berubah menjadi pertanian (beige) di t2, dianggap tidak realistis. Setelah filter diterapkan, piksel tengah disesuaikan sehingga stabil dan konsisten. Prinsip yang sama diterapkan untuk rangkaian 4- dan 5-tahun. Aturan ini tidak berlaku pada tahun pertama dan terakhir (misal 1990 dan 2024) karena tidak ada tahun untuk dibandingkan.



Filter temporal tengah - 3 tahun



Filter temporal tengah - 4 tahun



Filter temporal tengah - 5 tahun

Gambar 5. Ilustrasi mekanisme filter temporal

Filter tahun pertama memperbaiki ketidakkonsistenan akibat informasi yang hilang pada tahun 1990. Misalnya, perubahan dari pertanian ke hutan pada tahun-tahun berikutnya dianggap tidak realistis di wilayah evaluasi. Sedangkan filter tahun terakhir memperbaiki piksel yang salah klasifikasi pada akhir rangkaian waktu (2024), misalnya sebuah piksel yang awalnya diklasifikasikan sebagai hutan dapat dikoreksi menjadi pertanian, sehingga rangkaian waktu menjadi homogen.

Filter ini fleksibel, memungkinkan penambahan atau pengecualian kelas yang perlu dikoreksi. Evaluator memilih kelas yang cocok karena beberapa kelas memang dapat mengalami perubahan cepat, misalnya dari hutan ke mosaik pertanian/padang rumput. Tujuan utama dari filter ini adalah memperoleh rangkaian waktu yang stabil tanpa lonjakan inkonsisten yang dapat memengaruhi laporan statistik atau klasifikasi. Selain kelas, tahun tertentu juga dapat dikecualikan, biasanya pada tahun menengah ketika rangkaian tetap stabil untuk beberapa periode tetapi tidak untuk periode lainnya.

3.4.6.4. Filter Frekuensi

Filter frekuensi ini mempertimbangkan frekuensi kemunculan kelas di seluruh periode analisis. Dengan demikian, jumlah kemunculan kelas tutupan lahan yang kurang dari persentase tertentu akan difilter, misalnya kurang dari 3 dari 23 tahun (10 persen). Mekanisme ini mengurangi bias dari *false-positive* dan mempertahankan trayektori yang terkonsolidasi. Pada peta tematik frekuensi filter disesuaikan dengan karakteristik kelas masing-masing, lebih lanjut dapat dilihat pada lampiran.

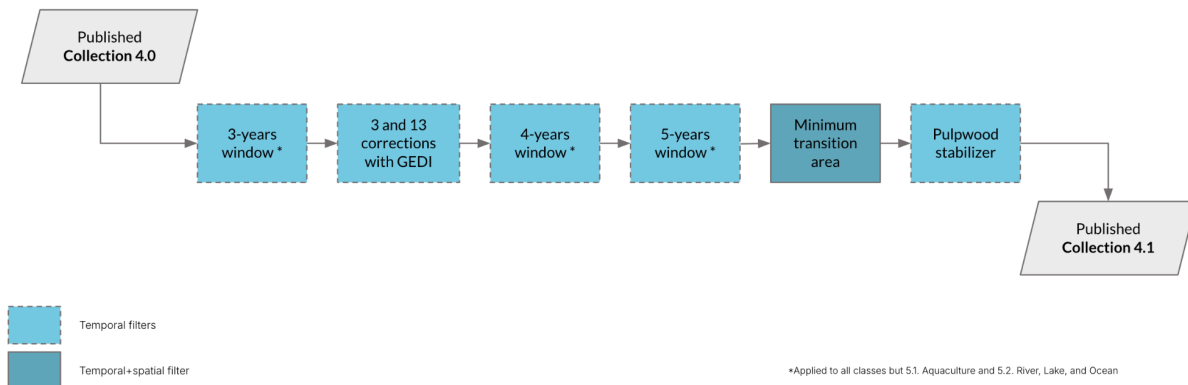
3.4.6.5. Filter Insiden

Filter insiden digunakan untuk menghapus piksel yang terlalu sering berubah selama periode analisis. Semua piksel yang berubah lebih dari delapan kali dan terhubung kurang dari 6 piksel diganti dengan nilai piksel dari posisi yang sama dari tahun lainnya. Mekanisme ini menghilangkan perubahan yang tidak realistis dan menghilangkan noise dari trayektori kelas tutupan/penggunaan lahan. Pada peta tematik frekuensi filter disesuaikan dengan karakteristik kelas masing-masing, lebih lanjut dapat dilihat pada lampiran.

3.4.7. Pengembangan Koleksi 4.1

Koleksi 4.1 dikembangkan untuk meningkatkan konsistensi data tutupan dan penggunaan lahan historis dari 1990 hingga 2024 serta memperbaiki representasi transisi dari kelas alami ke kelas antropogenik. Koleksi ini menyediakan peta tahunan beserta dataset terkait yang mencakup seluruh wilayah Indonesia, sekaligus menyempurnakan Koleksi 4.0 sebelumnya yang dirilis pada Agustus 2025.

Perbaikan utama pada Koleksi 4.1 meliputi penerapan serangkaian filter temporal baru dan integrasi data tambahan dari Global Ecosystem Dynamics Investigation (GED) untuk memperbaiki kualitas peta tutupan lahan dan transisi. Aturan transisi juga direvisi untuk lebih akurat menggambarkan kelas vegetasi non-hutan alami, yang sebagian besar berasal dari konversi historis wilayah hutan akibat aktivitas manusia, seperti pembukaan lahan untuk perkebunan kelapa sawit dan hutan tanaman industri. Untuk keperluan analisis transisi, kelas ini diklasifikasikan sebagai antropogenik.



Gambar 6. Alur kerja Koleksi 4.1

Alur kerja ini menggambarkan langkah-langkah transformasi MapBiomas Indonesia dari Koleksi 4.0 menjadi Koleksi 4.1. Proses dimulai dari Koleksi 4.0 yang telah dipublikasikan, kemudian diterapkan serangkaian filter temporal, filter spasial, dan koreksi untuk meningkatkan konsistensi data historis dan akurasi transisi tutupan lahan.

- Filter jendela 3 tahun: meratakan variabilitas temporal jangka pendek di semua kelas kecuali akuakultur dan badan air.
- Koreksi dengan GEDI: mengintegrasikan data Global Ecosystem Dynamics Investigation untuk menyempurnakan karakterisasi hutan dan vegetasi non-hutan alami. Data GEDI digunakan untuk memperbaiki kebisingan klasifikasi antara kelas Formasi Hutan (3) dengan tinggi kanopi lebih dari 15 meter dan kelas Vegetasi Alami Lainnya (13). Pengukuran tinggi kanopi GEDI memberikan informasi struktur hutan yang akurat, sehingga piksel yang salah klasifikasi akibat kemiripan spektral atau kebisingan transisi dapat dikoreksi dengan tepat. Area dengan tinggi kanopi di atas 15 meter yang sebelumnya dikategorikan sebagai Vegetasi Alami Lainnya dikoreksi menjadi Formasi Hutan.
- Filter jendela 4 tahun dan 5 tahun: melakukan perataan temporal lebih lanjut untuk mengurangi noise klasifikasi.
- Minimum area transisi: filter temporal dan spasial gabungan untuk menghilangkan transisi kecil yang kemungkinan besar palsu.
- Stabilisasi kelas kebun kayu: menyesuaikan klasifikasi di kelas kebun kayu agar konsisten sepanjang waktu.

4. Integrasi Peta

Peta kelas dasar (*basic theme*) dan peta lintas sektor (*cross-cut theme*) diintegrasikan piksel demi piksel melalui tumpang susun (*overlay*) berdasarkan hierarki kelas mengikuti aturan prevalensi yang telah ditetapkan.

5. Strategi Validasi

Strategi validasi peta tutupan dan penggunaan lahan didasarkan pada dua pendekatan. Pertama, validasi dilakukan melalui analisis komparatif peta Koleksi 4 dengan peta-peta referensi, dan Kedua, analisis akurasi berdasarkan teknik statistik menggunakan sampel independen yang mencakup seluruh wilayah Indonesia pada periode waktu tertentu. Sejak Koleksi 2 proses penghitungan nilai akurasi menggunakan sampel independen sebagai data referensi yang proses validasinya dilakukan oleh 10 perguruan tinggi yang tersebar di Indonesia.

5.1. Validasi dengan Peta Referensi

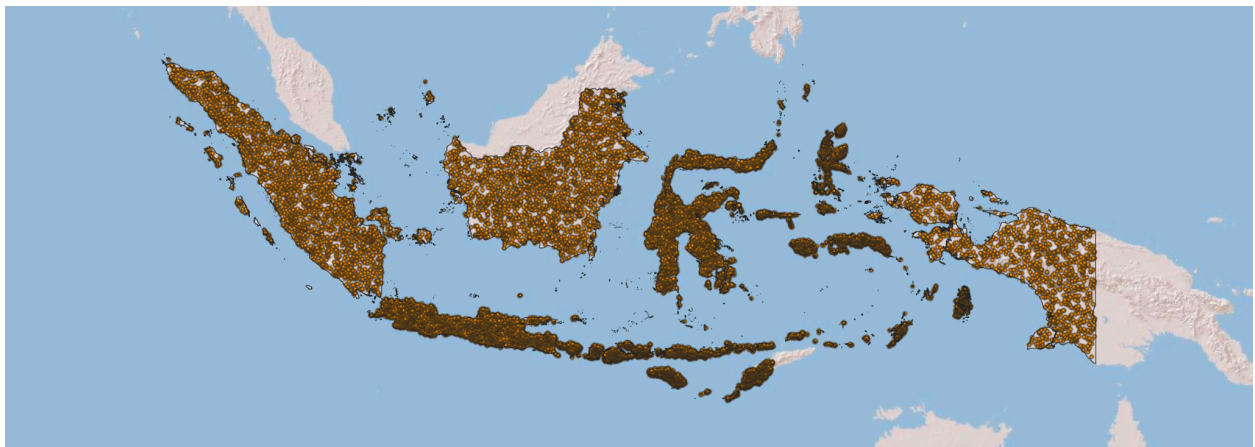
Setiap peta tutupan dan penggunaan lahan divalidasi dengan peta referensi yang tersedia melalui analisis kesepakatan spasial (*spatial agreement test*) untuk melihat kesesuaian antara peta Koleksi 4 dengan peta referensi. Peta-peta referensi yang digunakan dapat dilihat pada: [referensi](#), sementara hasil perbandingan peta dapat dilihat pada lampiran.

5.2. Validasi dengan Sampel Independen

Validasi dengan sampel independen dilakukan secara berkala setiap 2 tahun koleksi. Mulai dari koleksi 2 dan validasi berikutnya di Koleksi 4. Pada Koleksi 2 sebanyak 12.957 sampel independen digunakan untuk memvalidasi peta tutupan lahan dan penggunaan lahan tahunan MapBiomass

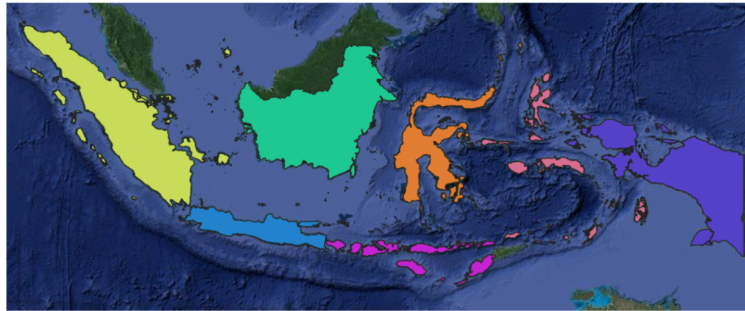
Indonesia. Jumlah dan sebaran sampel ditentukan dengan teknik statistik pengambilan sampel. Sampel diperiksa secara visual menggunakan citra Landsat dan citra beresolusi tinggi dari Google Earth, dengan cara menetapkan kelas penggunaan lahan dan tutupan lahan untuk setiap tahun dari tahun 1990 hingga 2024. Jumlah dan sebaran sampel secara rinci dapat lihat pada lampiran.

Setiap sampel diperiksa oleh 15 tim yang beranggotakan 3 orang di setiap timnya (45 interpreter). Tim independen ini berasal dari 10 perguruan tinggi di Indonesia meliputi Universitas Syiah Kuala, Universitas Bengkulu, Universitas Lampung di Sumatera; Universitas Muhammadiyah Palangkaraya dan Universitas Mulawarman di Kalimantan; Universitas Tadulako di Sulawesi; Universitas Papua di Papua, serta Universitas Indonesia, Universitas Gadjah Mada, dan Institut Pertanian Bogor di Jawa.



Gambar 7. Sebaran sampel validasi

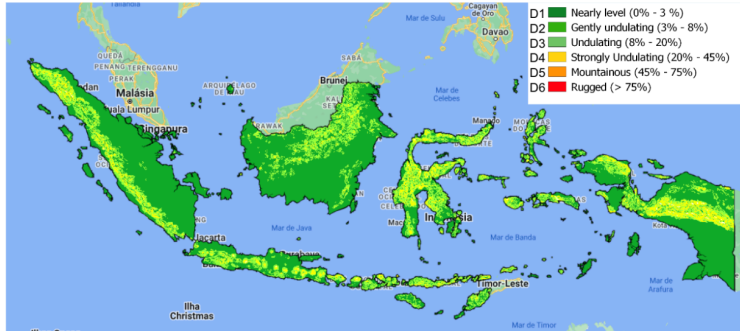
Setiap interpreter di dalam tim yang sama memeriksa dan menentukan kelas tutupan lahan pada titik yang sama. Sampel sebagai referensi ditetapkan berdasarkan 2 kesamaan pendapat atau lebih hasil interpretasi. Semua sampel independen yang sudah diperiksa kemudian dievaluasi dan ditetapkan sebagai data referensi oleh 10 pakar. Semua proses validasi dilakukan menggunakan platform Temporal Visual Inspection (TVI) yang dikembangkan oleh LAPIG/UFG.



Stratified Random Sampling
Strata: 42

Confidence interval: 95%
Max. error: +- 3%
Min. samples: 500 (Bonferroni correction)

12.957 samples



Region	D01	D02	D03	D04	D05	D06	Total
Bali - Nusa Tenggara	109	323	580	694	213	16	1935
Jawa	280	581	528	338	86	7	1820
Kalimantan	262	611	647	446	125	6	2097
Maluku	99	318	535	622	209	14	1797
Papua	135	336	298	238	117	16	1140
Sulawesi	121	300	499	784	336	23	2063
Sumatera	335	715	566	339	138	12	2105
							12957

Gambar 8. Desain sampel

Desain pengambilan sampel menggunakan *stratified random sampling* yang mempertimbangkan kelompok unit analisis minimum wilayah meliputi tujuh region: Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, Jawa, Bali dan Nusa Tenggara, Maluku, Papua dan enam kelas lereng berdasarkan data SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) dengan total 42 strata. Interval kepercayaan yang digunakan adalah 95 % dengan kesalahan minimum +- 3%. Jumlah sampel minimal di setiap region adalah 500 sampel (Bonferroni Correction). Rumus yang digunakan untuk mengukur sampel di setiap region direpresentasikan dalam Persamaan 1.

$$n = \max_{p-q} \left(\frac{N z_{\gamma}^2 pq}{(N - 1)E^2 + z_{\gamma}^2 pq} \right),$$

Persamaan 1. Ukuran sampel per region

Dimana n adalah ukuran sampel; N adalah jumlah poin; E adalah margin kesalahan maksimum; p adalah proporsi yang ingin diperkirakan; q=1-p dan z adalah faktor distribusi normal standar yang sesuai dengan tingkat kepercayaan $1-\alpha_g$ yang dihitung menggunakan koreksi Bonferroni, di mana $\alpha_g = \alpha / k-1$ dan $1-\alpha$ tingkat kepercayaan yang diinginkan; k adalah jumlah kelas tutupan lahan.

Analisis akurasi menggunakan matriks yang membandingkan kelas yang dipetakan dengan kelas sampel referensi [10], [11] untuk memperoleh akurasi global, pengguna dan produsen. Akurasi global tutupan dan penggunaan lahan dihitung untuk setiap tahun, kelas, dan region.

Referensi

- [1] Carbon Brief. 2021. Analysis: Which countries are historically responsible for climate change? <https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/>
- [2] Carlos M. Souza Jr. 2020. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sens.* 2020, 12(17), 2735; <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.
- [3] Kementerian Dalam Negeri Indonesia. 2022. Keputusan Menteri Dalam Negeri Nomor 050-145 Tahun 2022 Tentang Pemberian dan Pemutakhiran Kode, Data Wilayah Administrasi Pemerintahan, dan Pulau Tahun 2021.
- [4] J. R. G. TOWNSHEND and C. O. JUSTICE, "Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 9, no. 2, pp. 187–236, Feb. 1988.
- [5] A. V. Egorov, D. P. Roy, H. K. Zhang, Z. Li, L. Yan, and H. Huang, "Landsat 4, 5 and 7 (1982 to 2017) Analysis Ready Data (ARD) observation coverage over the conterminous United States and implications for terrestrial monitoring," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 4, 2019.
- [6] M. A. Wulder et al., "Current status of Landsat program, science, and applications," *Remote Sens. Environ.*, vol. 225, pp. 127–147, 2019.
- [7] <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions#multimedia>
- [8] Google Earth Engine. 2022. <https://earthengine.google.com/>
- [9] Olofsson et al. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment* Volume 148, 25 May 2014, Pages 42-57.
- [10] Stephen V. Stehman. 2014. Estimating area and map accuracy for stratified random sampling when the strata are different from the map classes, *International Journal of Remote Sensing*, 35:13, 4923-4939, 11 July 2014
- [11] Stephen V. Stehman, Giles M. Foody. 2019. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment* Volume 231, 15 September 2019, 111199.
- [12] H. Yang, S. Li, J. Chen, X. Zhang, and S. Xu, "The Standardization and harmonization of land cover classification systems towards harmonized datasets: A review," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 6, no. 5, pp. 1–16, 2017.

- [13] A. Di Gregorio and L. J. M. Jansen, "Land cover classification system (LCCS): classification concepts and user manual for software version 1.0." FAO, 2000.
- [14] M. Shinozuka and B. Mansouri, "4 - Synthetic aperture radar and remote sensing technologies for structural health monitoring of civil infrastructure systems," in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, V. M. Karbhari and F. B. T.-S. H. M. of C. I. S. Ansari, Eds. Woodhead Publishing, 2009, pp. 113–151.