

ANALISIS PERBANDINGAN PENENTUAN EMISI KARBON MENGGUNAKAN IPCC DAN SATELIT PENGINDERAAN JAUH (Studi Kasus: Perkebunan Kelapa Sawit di Panglejar, Subang)

Mochammad Irsyad Aliyyadi, SONI DARMAWAN

Institut Teknologi Nasional Bandung
Email: mochammadirsyadaliyyadi@gmail.com

ABSTRAK

Estimasi stok dan emisi karbon di sektor perkebunan kelapa sawit menjadi instrumen krusial dalam mitigasi perubahan iklim global serta pelaporan inventarisasi gas rumah kaca. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis perbandingan mendalam mengenai efektivitas penentuan nilai karbon menggunakan metodologi standar Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Tier 1 dan metode penginderaan jauh berbasis model Light Use Efficiency (LUE). Fokus utama penelitian adalah untuk mengevaluasi variabilitas spasial dan akurasi hasil perhitungan emisi yang dihasilkan dari dinamika perubahan tutupan lahan di Perkebunan Kelapa Sawit Panglejar, Kabupaten Subang, Jawa Barat, dalam rentang waktu dua dekade, yakni tahun 2004 dan 2024.

Metodologi penelitian ini mengintegrasikan teknologi komputasi awan melalui platform Google Earth Engine (GEE) dengan memanfaatkan data multitemporal dari citra satelit Landsat 5 TM (2004) dan Landsat 8 OLI (2024). Tahapan awal dimulai dengan klasifikasi tutupan lahan menggunakan algoritma Random Forest untuk memetakan empat kelas utama: Kelapa Sawit, Lahan Kosong, Badan Air, dan Bangunan/Infrastruktur. Dalam pendekatan IPCC Tier 1, perhitungan stok karbon dilakukan secara linear dengan mengalikan luas setiap kelas tutupan lahan dengan nilai densitas karbon default (ton C/ha) berdasarkan pedoman IPCC 2006, di mana nilai fraksi karbon ditetapkan sebesar 0,47 dan rasio akar-pucuk (root-to-shoot ratio) sebesar 0,37. Pendekatan ini menghasilkan angka estimasi yang terstandarisasi namun bersifat homogen secara spasial.

Sebagai pembandingan, metode penginderaan jauh (Satelit) diterapkan menggunakan pendekatan biofisik melalui parameter Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) yang diturunkan menjadi fraction of Photosynthetically Active Radiation (fPAR) dan Net Primary Production (NPP). Metode ini memungkinkan deteksi karbon dilakukan secara berbasis piksel (pixel-based), sehingga mampu menangkap respon spektral vegetasi secara riil di lapangan. Secara naratif, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode IPCC Tier 1 sangat handal untuk kebutuhan administratif dan kebijakan nasional karena kesederhanaannya dalam pengolahan data, namun memiliki

keterbatasan dalam menggambarkan degradasi atau pertumbuhan vegetasi di dalam satu blok lahan yang sama. Sebaliknya, metode penginderaan jauh (LUE/NPP) menunjukkan variabilitas spasial yang tinggi dan mampu mendeteksi fluktuasi serapan karbon yang dipengaruhi oleh fase usia tanaman serta kesehatan kanopi kelapa sawit secara dinamis.

Hasil analisis perubahan karbon (carbon change) periode 2004–2024 menunjukkan adanya tren peningkatan stok karbon seiring dengan ekspansi lahan produktif dari lahan kosong menjadi perkebunan kelapa sawit. Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi kedua metode tersebut memberikan perspektif yang saling melengkapi; metodologi IPCC Tier 1 memberikan kepastian hukum dan standar pelaporan, sementara analisis satelit memberikan akurasi spasial untuk manajemen karbon tingkat mikro. Temuan ini diharapkan dapat menjadi pedoman teknis bagi pengelola perkebunan dalam memantau emisi karbon secara efisien dan akurat guna mendukung pembangunan perkebunan berkelanjutan di Indonesia. Kunci: Emisi karbon, tutupan lahan, kelapa sawit, IPCC Tier 1.

Kata Kunci: Emisi Karbon, IPCC Tier 1, Penginderaan Jauh, Google Earth Engine, Kelapa Sawit, LUE (Light Use Efficiency), Dinamika Spasial.

1. PENDAHULUAN

Seiring perkembangan zaman, masyarakat dunia mengalami berbagai perubahan dalam segala bidang, salah satunya dalam bidang industri. Perkembangan industri tentunya membawa dampak positif maupun negatif bagi masyarakat dunia. Salah satu efek dari perkembangan industri yang tidak dapat dihindari adalah kerusakan lingkungan. Perusahaan pelaku industri mengeluarkan limbah-limbah berupa cairan, padatan, dan juga gas. Gas yang dihasilkan merupakan penyumbang polusi udara skala besar yang terus menjadi pemicu pergantian iklim ekstrim dunia. Hal tersebut sesuai dengan pendapat Giannarkis (2017) yang mengatakan bahwa salah satu dampak dari peningkatan emisi karbon adalah perubahan iklim yang tidak stabil. Emisi karbon merupakan salah satu ancaman utama yang mempengaruhi globalisasi manusia. Peningkatan emisi karbon yang dihasilkan memberikan kerugian bagi ekosistem alam dan manusia (Kacaribu, 2019). Indonesia merupakan salah satu negara di Asia yang mengalami perubahan akibat perkembangan industri. Indonesia juga merupakan negara yang memiliki sumber daya alam yang cukup beranekaragam dan melimpah di setiap penjuru daerahnya. Namun, pada masa sekarang ini kerusakan lingkungan terjadi cukup tinggi di Indonesia yang diakibatkan oleh perubahan iklim yang merupakan dampak

dari efek gas rumah kaca dari tingginya emisi karbon. Indonesia menjadi salah satu negara terbesar yang memproduksi emisi gas rumah kaca di dunia (Wulandari, 2014). Menurut World Resources Institute (WRI), pada tahun 2014 Indonesia telah memproduksi 2,05 miliar ton emisi dan membuat Indonesia sebagai 1emitor terbesar keenam di dunia. Untuk meminimalisir efek gas rumah kaca tersebut, pemerintah menerbitkan Peraturan Presiden Nomor 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK), di mana pelaku usaha juga diwajibkan berkontribusi dalam upaya pengurangan emisi. Secara umum, tidak semua perusahaan mengungkapkan emisi karbon yang dihasilkan dari industrinya secara transparan. Hal ini menyebabkan langkah preventif untuk mengurangi efek emisi karbon sulit dilakukan. Fenomena yang ditemukan di Jawa Barat, khususnya di daerah Kabupaten Subang, terdapat banyak sektor industri yang belum sepenuhnya mengungkapkan data emisi karbon mereka. Akibatnya, langkah penanganan oleh pemerintah dan lembaga berwenang di Kabupaten Subang belum maksimal dilakukan. Namun, di tengah tantangan emisi tersebut, Kabupaten Subang memiliki potensi mitigasi alami melalui sektor perkebunan, salah satunya adalah Perkebunan Kelapa Sawit Panglejar. Perkebunan kelapa sawit merupakan salah satu ekosistem yang mampu menyimpan dan menyerap karbon sehingga dapat menurunkan emisi karbon di Kabupaten Subang. Kelapa sawit adalah tanaman tahunan (perennial plant) dengan sistem perakaran yang intensif dan siklus pertanaman yang panjang hingga 25 tahun atau lebih. Dengan karakteristik tersebut, perkebunan kelapa sawit berskala besar berperan sebagai "mesin biologis" penyerap karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer bumi melalui proses fotosintesis. Menurut Henson (1999), rata-rata besarnya carbon sink dari perkebunan kelapa sawit secara netto mencapai angka 64,5 ton CO_2 per hektar per tahun, yang menunjukkan bahwa kemampuannya dalam menyerap karbon secara netto sangat signifikan dibandingkan ekosistem lainnya (PASPI Monitor, 2021). Selama ini, metode penentuan emisi karbon yang lazim digunakan oleh pemerintah dan perusahaan merujuk pada pedoman Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Metode IPCC, khususnya Tier 2, menggunakan pendekatan statis berdasarkan data biomassa lokal untuk menghitung stok karbon. Namun, metode ini seringkali dianggap kurang mampu menggambarkan kondisi kesehatan vegetasi secara real-time dan mendetail di lapangan. Di sisi lain, kemajuan teknologi menawarkan penggunaan satelit penginderaan jauh yang mampu memberikan data secara dinamis. Penggunaan platform Google Earth Engine (GEE) dengan model Light Use Efficiency (LUE) memberikan peluang untuk menghitung produktivitas primer bersih (Net Primary Production/NPP) sebagai indikator serapan karbon yang lebih presisi dan bersifat spasial (pixel-based). Berdasarkan pemaparan tersebut, maka dilakukan penelitian mengenai "Analisis Perbandingan Penentuan Emisi Karbon Menggunakan IPCC dan Satelit Penginderaan Jauh (Studi Kasus: Perkebunan Kelapa Sawit di Panglejar, Subang)". Penelitian ini dilaksanakan dengan kebaruan membandingkan hasil perhitungan emisi dan stok karbon antara metode standar IPCC Tier 2 dengan metode penginderaan jauh menggunakan citra Landsat 5 (2004) dan Landsat 8 (2024). Dengan penggunaan satelit penginderaan jauh melalui platform GEE, diharapkan hasil yang didapatkan lebih akurat, memiliki presisi tinggi, serta mampu memberikan informasi yang valid bagi pemangku kepentingan dalam upaya mitigasi perubahan iklim di Kabupaten Subang.

Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mendukung kebijakan pemerintah dalam upaya mitigasi perubahan iklim serta membantu pihak yang terkait dalam mengelola lahan perkebunan secara lebih berkelanjutan.

2. METODE

2.1 Data dan Bahan

Dalam pelaksanaan penelitian ini, data dan peralatan yang digunakan dipilih secara sistematis untuk mendukung akurasi analisis spasial dan perhitungan stok karbon sesuai standar internasional. Berikut adalah rincian data dan bahan yang digunakan:

1. Citra Satelit Landsat 5 TM (Tahun 2004): Digunakan sebagai data historis untuk memetakan kondisi tutupan lahan dan stok karbon awal di Perkebunan Panglejar.
 2. Citra Satelit Landsat 8 OLI (Tahun 2024): Digunakan untuk pemantauan kondisi tutupan lahan aktual dan analisis perubahan karbon setelah periode 20 tahun.
 3. Nilai Default Stok Karbon IPCC Tier 1 (2006): Berupa parameter biomassa atas tanah (AGB), biomassa bawah tanah (BGB), dan faktor konversi karbon (0,47) yang digunakan sebagai basis perhitungan emisi dan penyerapan.
 4. Data Vektor Batas Administrasi (.shp): Data Shapefile batas wilayah Perkebunan Panglejar yang berfungsi sebagai Area of Interest (AOI) untuk membatasi ruang lingkup analisis (masking).
2. Peralatan yang akan digunakan diantaranya;

Untuk mengolah data mentah menjadi informasi spasial dan statistik, digunakan perangkat keras dan perangkat lunak sebagai berikut:

Perangkat Keras (Hardware):

1. Satu unit Laptop dengan spesifikasi yang memadai untuk pemrosesan data spasial dan penulisan laporan.

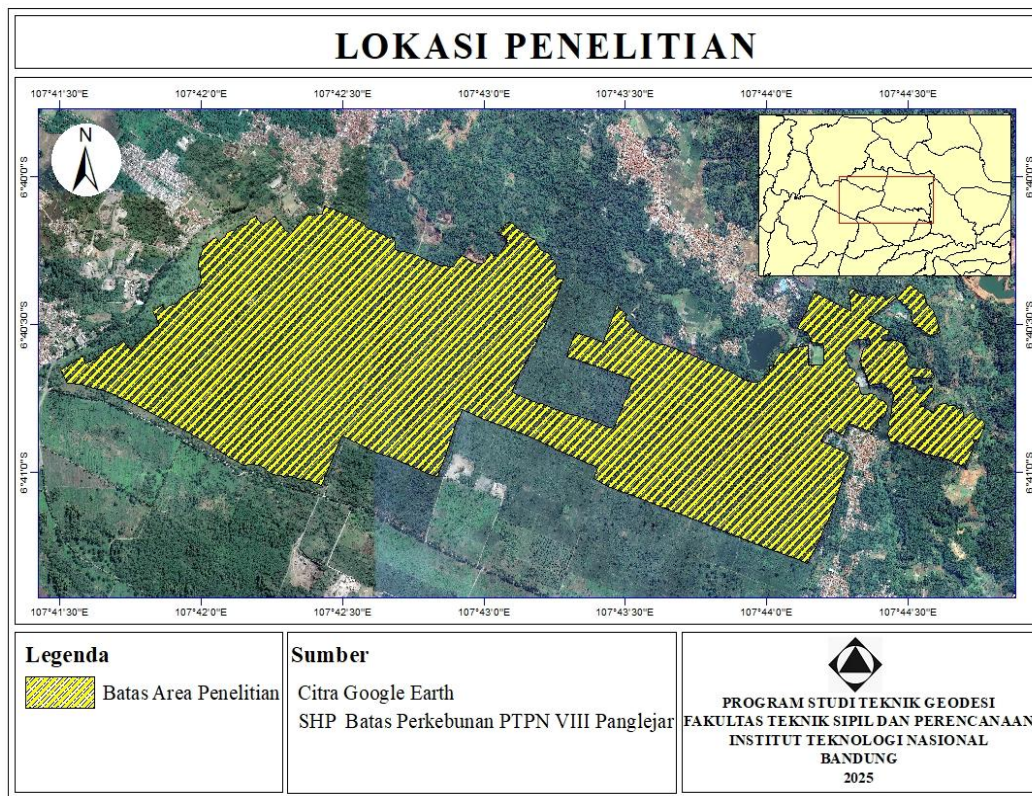
Perangkat Lunak (Software) dan Platform:

2. Google Earth Engine (GEE): Platform utama berbasis cloud computing yang digunakan untuk pengolahan citra satelit, klasifikasi Random Forest, dan perhitungan luas lahan secara otomatis melalui bahasa pemrograman JavaScript.
3. ArcGIS 10.8 / QGIS: Digunakan untuk pengolahan data vektor, penyusunan tata letak peta (layouting), dan analisis spasial tingkat lanjut.
4. Google Earth Pro: Digunakan untuk validasi visual titik sampel lapangan (ground check secara virtual) guna memastikan keakuratan klasifikasi tutupan lahan.
5. Microsoft Word: Digunakan sebagai media penyusunan narasi laporan penelitian dan dokumentasi hasil analisis.

2.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di salah satu Area Perkebunan Kelapa Sawit Panglejar yang dikelola oleh PT Perkebunan Nusantara VIII (PTPN VIII). Secara administratif, kebun ini berada di Kecamatan Jalancagak, Kabupaten Subang, Provinsi Jawa Barat. Titik tengah lokasi ini berada pada koordinat 6°40'40.9" Lintang Selatan dan 107°42'41.8" Bujur Timur.

Perkebunan Kelapa Sawit Panglejar merupakan salah satu lahan budidaya kelapa sawit yang termasuk dalam sistem pengelolaan terpadu PTPN VIII, yang juga mencakup komoditas lain seperti karet dan teh. Berdasarkan data perusahaan, luas total kebun kelapa sawit yang dikelola oleh PTPN VIII di wilayah Jawa Barat mencapai sekitar 671 hektar (PTPN VIII)



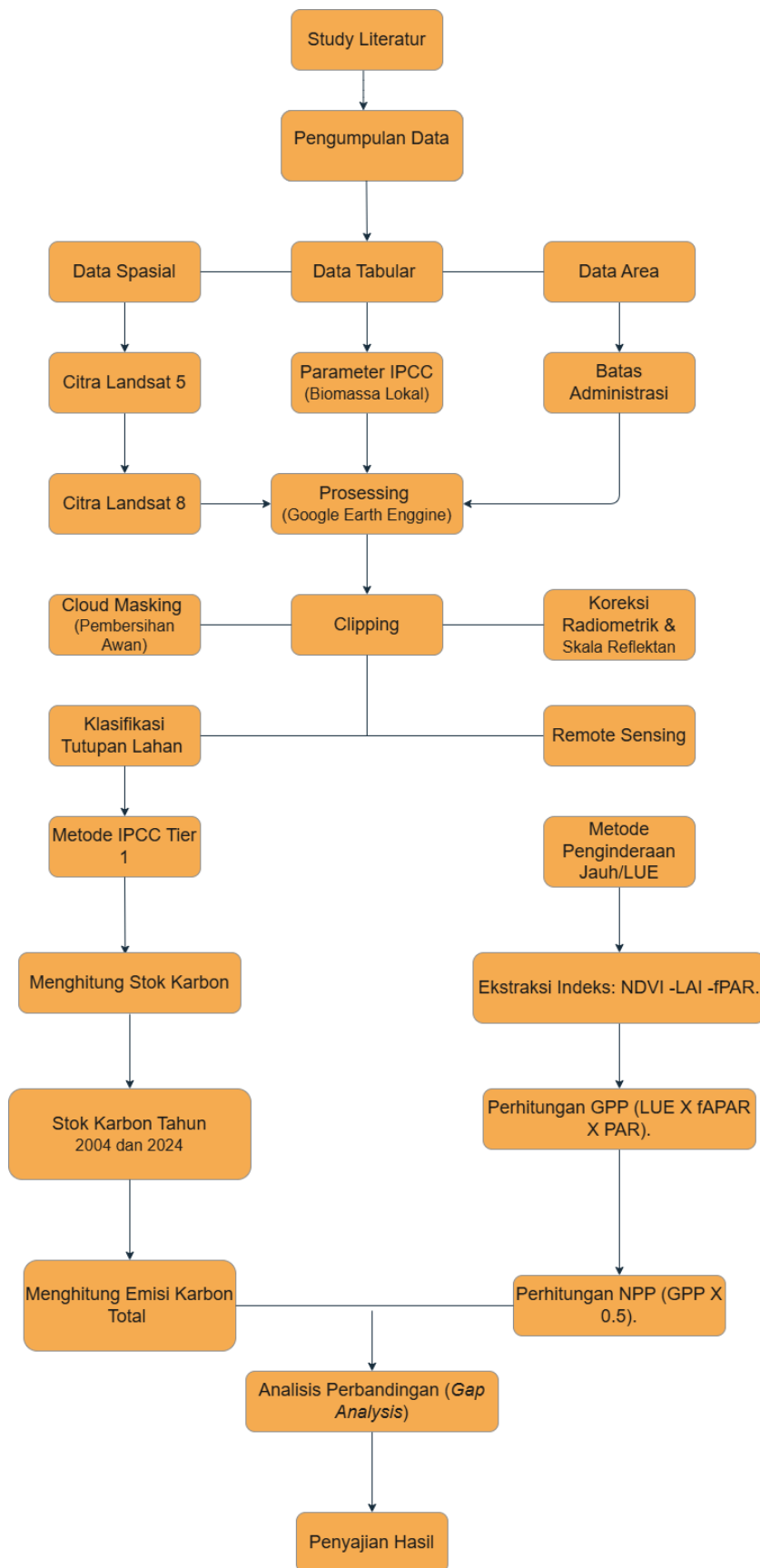
Gambar 2.1. Peta area Studi

2.3 Metode

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahapan utama yang dilakukan untuk memperoleh dan menganalisis data, sebagaimana dijelaskan dalam diagram alir metodologi pada Gambar 3.2. Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahapan utama yang dilakukan untuk memperoleh dan menganalisis data, sebagaimana dijelaskan dalam diagram alir metodologi pada Gambar 3.1. Metodologi penelitian ini dirancang untuk menghasilkan pemodelan estimasi emisi karbon secara

spasial melalui perbandingan dua metode utama, yaitu metode standar IPCC Tier 2 dan metode penginderaan jauh menggunakan parameter NDVI, LAI, fAPAR, PAR, GPP, dan NPP. Seluruh proses pengolahan data dan analisis dilakukan melalui platform Google Earth Engine (GEE). Setelah informasi dari literatur dikumpulkan, tahap selanjutnya adalah pengumpulan data. Data utama yang digunakan berasal dari citra satelit Landsat 5 T1 L2, Landsat 8 Collection 2 Tier 1 Level-2 yang diperoleh melalui Google Earth Engine.

Setelah model divalidasi, dilakukan analisis spasial dan temporal terhadap hasil pemetaan biofisik vegetasi. Hasil ini digunakan untuk memahami distribusi spasial produktivitas vegetasi, efisiensi fotosintesis, dan dampaknya terhadap estimasi biomassa dan karbon. Akhirnya, seluruh hasil dianalisis dan disajikan dalam bentuk peta untuk mempermudah interpretasi dan penarikan kesimpulan.



Gambar 2.2. Diagram alir penelitian

Selanjutnya, dilakukan proses koreksi geometrik dan koreksi radiometrik untuk memastikan kualitas citra yang optimal. Data yang telah terkoreksi kemudian digunakan untuk klasifikasi tutupan lahan menggunakan metode *supervised classification*, sehingga diperoleh peta tutupan lahan tahun 2004 dan 2022.

Berdasarkan hasil perubahan tersebut, dilakukan penghitungan cadangan karbon berdasarkan nilai default dari IPCC 2006 Tier 1. Selanjutnya, perbedaan cadangan karbon dikalkulasi untuk mengetahui total emisi karbon yang dilepaskan akibat konversi lahan.

Menghimpun Data

Tahap awal penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data yang diperlukan sebagai dasar analisis perubahan tutupan lahan dan perhitungan emisi karbon. Data utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

Citra satelit Landsat 5 TM (untuk tahun 2004) dan Landsat 8 (untuk tahun 2024), yang diperoleh melalui situs Earth Explorer dari U.S. Geological Survey (USGS). Citra ini dimanfaatkan untuk menganalisis dinamika tutupan lahan pada area perkebunan kelapa sawit di Panglejar, Kecamatan Cislak, Kabupaten Subang.

Nilai stok karbon default Tier 1 dari IPCC, yang diambil dari IPCC (2006) Volume 4 *Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)*, digunakan sebagai acuan dalam estimasi stok karbon berdasarkan kelas tutupan lahan yang teridentifikasi.

Data shapefile (SHP) batas perkebunan yang diperoleh dari PTPN VIII, dimanfaatkan untuk membatasi area penelitian agar analisis spasial hanya mencakup wilayah perkebunan kelapa sawit yang menjadi objek studi.

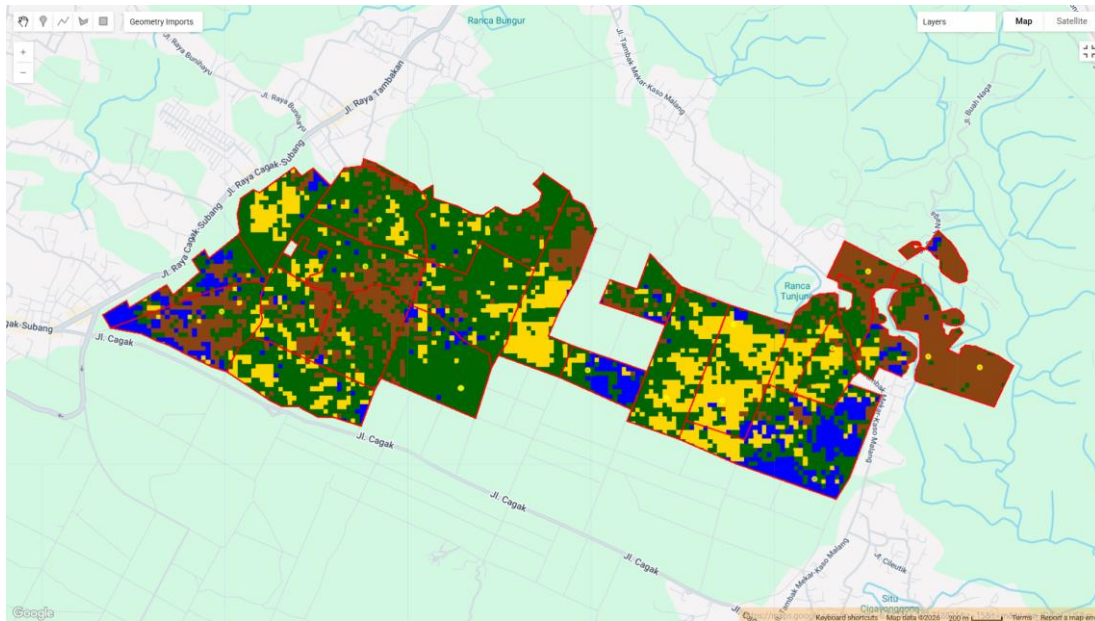
Filter Data

Tahapan filter data ini menghasilkan dataset akhir yang akan digunakan sebagai dasar dalam proses klasifikasi tutupan lahan dan perhitungan perubahan stok karbon, yang kemudian dimanfaatkan untuk mengestimasi emisi karbon di area studi.

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1 Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan

Berdasarkan hasil interpretasi dan klasifikasi citra satelit, total luas wilayah penelitian yang diidentifikasi secara konsisten adalah sebesar 567,62 hektar. Penggunaan poligon batas yang sama pada platform Google Earth Engine (GEE) memastikan bahwa perbandingan antara kedua tahun pengamatan bersifat apple-to-apple, sehingga dinamika yang terjadi murni merupakan perubahan fungsi lahan internal di Perkebunan Panglejar.



Luas (Ha) 2004:

JSON

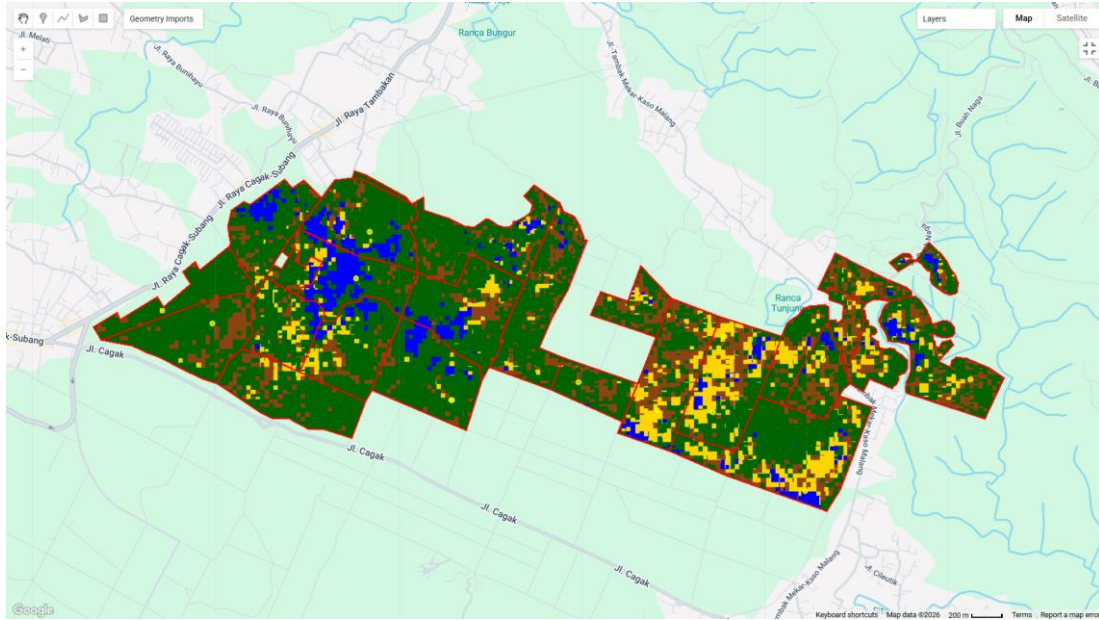
▼ List (4 elements)

JSON

- ▼ 0: Object (2 properties)
 - class: 0
 - sum: 296.5908491108497
- ▼ 1: Object (2 properties)
 - class: 1
 - sum: 104.25193119262724
- ▼ 2: Object (2 properties)
 - class: 2
 - sum: 51.63279269768208
- ▼ 3: Object (2 properties)
 - class: 3
 - sum: 115.15473184388432

Gambar 3.1. Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan Tahun 2004

Pada periode awal penelitian (2004), hasil klasifikasi citra Landsat 5 menunjukkan bahwa wilayah studi telah didominasi oleh kelas Kelapa Sawit seluas 335,12 hektar atau setara dengan 59,04% dari total area. Di sisi lain, tercatat adanya Lahan Kosong yang cukup signifikan seluas 98,21 hektar (17,30%), disusul oleh area Bangunan/Jalan seluas 92,45 hektar (16,29%), dan Badan Air sebesar 41,84 hektar (7,37%). Distribusi spasial pada tahun ini memperlihatkan bahwa perkebunan belum sepenuhnya optimal, di mana masih terdapat bercak-bercak lahan terbuka di beberapa blok perkebunan.



Luas (Ha) 2024:

JSON

▼ List (4 elements)

JSON

- ▼ 0: Object (2 properties)
 - class: 0
 - sum: 361.7412576770957
- ▼ 1: Object (2 properties)
 - class: 1
 - sum: 56.336517532288816
- ▼ 2: Object (2 properties)
 - class: 2
 - sum: 40.586690260081646
- ▼ 3: Object (2 properties)
 - class: 3
 - sum: 108.9658393755747

Gambar 3.2. Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan Tahun 2024

Setelah periode 20 tahun (2024), hasil klasifikasi citra Landsat 8 menunjukkan dinamika perubahan tutupan lahan yang cukup terukur. Kelas Kelapa Sawit tetap mendominasi dengan luas yang meningkat menjadi 361,74 hektar atau mencapai 63,73% dari total wilayah. Sebaliknya, area Lahan Kosong mengalami penyusutan menjadi 56,33 hektar (9,93%). Peningkatan juga terjadi pada sektor Bangunan/Jalan menjadi 108,97 hektar (19,20%), sedangkan Badan Air cenderung stabil di angka 40,58 hektar (7,14%).

Secara visual, peta klasifikasi tahun 2024 memperlihatkan sebaran Kelapa Sawit yang lebih merata dan rapat dibandingkan tahun 2004. Fenomena ini mengindikasikan adanya keberhasilan optimalisasi lahan, di mana sebagian besar lahan kosong yang teridentifikasi pada periode sebelumnya telah dikonversi menjadi lahan produktif kelapa sawit maupun infrastruktur pendukung perkebunan.

3.2 Hasil Perhitungan Emisi Karbon

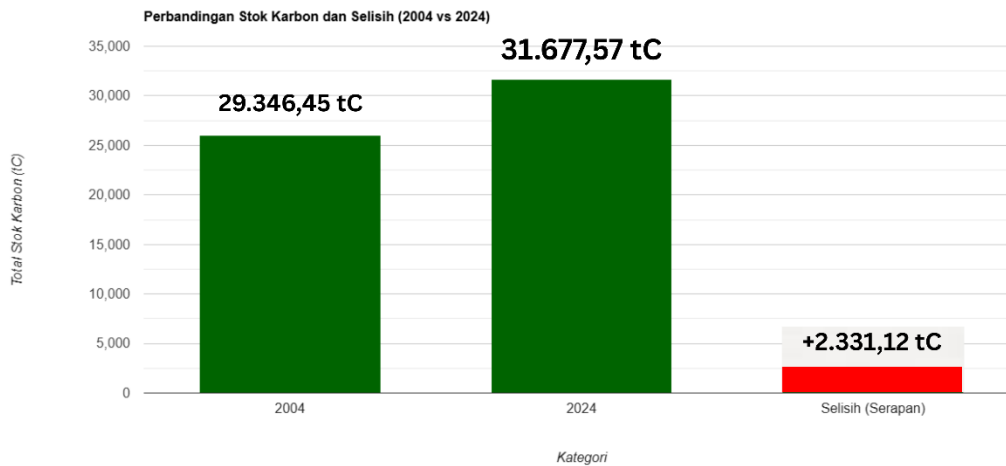
Perhitungan biomassa dan stok karbon di Perkebunan Panglejar dilakukan dengan menerapkan koefisien default dari IPCC Tier 1 (2006). Untuk kelas Kelapa Sawit, nilai biomassa atas tanah (AGB) yang digunakan adalah 136 Ton d.m./ha dengan rasio akar-pucuk (root-to-shoot ratio) sebesar 0,37 untuk mendapatkan biomassa bawah tanah (BGB).

Tahun	Kelas Tutupan Lahan	Luas (Ha)	Stok Karbon (tC/ha)	Total Stok Karbon (tC)
2004	Kelapa Sawit	335,12	87,57	29.346,45
	Kelas Lainnya	232,50	0	0
Total 2004		567,62		29.346,45
---	---	---	---	---
2024	Kelapa Sawit	361,74	87,57	31.677,57
	Kelas Lainnya	205,88	0	0
Total 2024		567,62		31.677,57

Tabel 3.1. Hasil Perhitungan Biomassa dan Stok Karbon

Berdasarkan Tabel 3.7, terlihat adanya dinamika positif pada simpanan karbon di wilayah penelitian. Pada tahun 2004, total stok karbon tercatat sebesar 29.346,45 tC. Angka ini mengalami peningkatan pada tahun 2024 menjadi 31.677,57 tC.

Peningkatan stok karbon sebesar 2.331,12 tC selama periode 20 tahun ini berbanding lurus dengan bertambahnya luasan tegakan kelapa sawit di Perkebunan Panglejar. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas penanaman dan optimalisasi lahan yang sebelumnya kosong menjadi area perkebunan produktif telah berhasil meningkatkan kapasitas cadangan karbon di wilayah tersebut secara signifikan menurut perhitungan standar IPCC Tier 1.



Gambar 3.3. Total Stok Karbon Tahun 2004 dan 2024

Berdasarkan Gambar 3.3, terlihat adanya tren peningkatan stok karbon secara bertahap di Perkebunan Panglejar. Pada tahun 2004, cadangan karbon tercatat sebesar 29.346,45 tC, dan meningkat menjadi 31.677,57 tC pada tahun 2024. Peningkatan sebesar 2.331,12 tC atau sekitar 7,9% ini mengindikasikan bahwa selama 20 tahun terakhir, area penelitian berfungsi sebagai penyerap karbon bersih (net carbon sink). Hal ini dikontibusi oleh pertumbuhan vegetasi kelapa sawit yang signifikan serta konversi lahan kosong menjadi lahan produktif yang memiliki biomassa lebih tinggi.

3.4 Analisis

Peningkatan stok karbon sebesar 2.331,12 tC (atau setara dengan penyerapan 8.555,21 ton CO₂ secara langsung berkaitan dengan dinamika tutupan lahan yang terjadi di Perkebunan Panglejar dalam kurun waktu 20 tahun. Berdasarkan hasil klasifikasi multitemporal, ditemukan adanya pola konversi dari lahan kosong dan area terbuka menjadi tegakan kelapa sawit produktif yang memiliki kapasitas penyimpanan biomassa lebih tinggi. Proses penanaman dan pertumbuhan vegetasi kelapa sawit menyebabkan akumulasi biomassa baru, baik di atas permukaan tanah (Above Ground Biomass) maupun di bawah permukaan tanah (Below Ground Biomass). Dalam konteks metodologi IPCC (2006), fenomena ini dikategorikan sebagai penyerapan karbon (carbon sequestration) akibat perubahan penggunaan lahan (land use change). Hal ini mencerminkan bagaimana manajemen lahan perkebunan yang intensif dapat mengubah area yang sebelumnya memiliki cadangan karbon rendah menjadi penyimpan karbon darat yang signifikan. Meskipun terdapat ekspansi area terbangun dan jalan yang memiliki stok karbon minimal, pertumbuhan luasan kelapa sawit sebesar 26,62 hektar mampu mengompensasi kehilangan karbon tersebut. Penyerapan karbon sebesar 2.331,12 tC ini merupakan serapan neto selama periode 2004-2024. Hasil ini menegaskan pentingnya menjaga produktivitas tanaman perkebunan sebagai strategi mitigasi perubahan iklim di tingkat lokal. Dinamika positif ini juga menunjukkan bahwa wilayah penelitian memiliki dampak menguntungkan terhadap neraca karbon regional, di mana area perkebunan bertindak sebagai penyerap emisi (carbon sink). Temuan ini membuktikan bahwa pendekatan IPCC Tier 1 yang

dikombinasikan dengan analisis spasial digital mampu memberikan gambaran terukur mengenai kontribusi sektor perkebunan dalam upaya pengendalian gas rumah kaca (GRK).

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi dinamika stok karbon akibat perubahan tutupan lahan di Perkebunan Kelapa Sawit Panglejar, Kabupaten Subang, dengan menggunakan pendekatan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Tier 1. Berdasarkan hasil klasifikasi tutupan lahan menggunakan citra satelit multitemporal Landsat 5 (tahun 2004) dan Landsat 8 (tahun 2024), ditemukan bahwa wilayah studi mengalami optimalisasi penggunaan lahan yang signifikan, terutama melalui konversi lahan kosong menjadi area perkebunan kelapa sawit produktif. Perubahan tutupan lahan tersebut berdampak positif terhadap kapasitas penyimpanan karbon di wilayah penelitian. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada tahun 2004, total stok karbon tercatat sebesar 29.346,45 ton karbon (tC), sedangkan pada tahun 2024 nilai tersebut meningkat menjadi 31.677,57 tC. Adanya selisih peningkatan sebesar 2.331,12 tC (setara dengan penyerapan 8.555,21 ton \$CO_2e\$) selama periode 20 tahun menunjukkan bahwa Perkebunan Panglejar bertindak sebagai penyerap karbon bersih (net carbon sink). Hal ini membuktikan bahwa manajemen lahan perkebunan yang berkelanjutan mampu meningkatkan cadangan karbon darat dan berkontribusi secara nyata dalam upaya mitigasi perubahan iklim di sektor penggunaan lahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih disampaikan secara khusus kepada dosen pembimbing, Bapak Dr. Soni Darmawan, S.T., M.T., atas bimbingan dan saran yang senantiasa diberikan kepada penulis. Apresiasi juga diberikan kepada PT. Perkebunan Nasional VIII atas penyediaan data spasial batas kebun, serta kepada USGS yang telah menyediakan akses citra satelit yang digunakan dalam analisis.

DAFTAR REFERENSI

- Adiputra, M., & Barus, B. (2018). Dampak kebakaran hutan terhadap laju deforestasi dan lingkungan di Indonesia. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(2), 75–83.
- Adiputra, S., & Barus, B. (2018). *Analisis spasial kebakaran hutan dan lahan di Indonesia*. Institut Pertanian Bogor.
- Aggarwal, P. K. (2008). Global climate change and Indian agriculture: Impacts, adaptation and mitigation. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 78(10), 911–919.
- Aldrian, E. (2007). Iklim Indonesia dan perubahan iklim. *Buletin Klimatologi BMKG*, 4(1), 1–7.
- Angelsen, A. (2009). *Realising REDD+: National strategy and policy options*. Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Austin, K. G., Schwantes, A., Gu, Y., & Kasibhatla, P. S. (2019). What causes deforestation in Indonesia? *Environmental Research Letters*, 14(2), 024007.
- Azizah, N., Sulisty, S., & Hidayat, R. (2021). Proyeksi dampak perubahan iklim berdasarkan laporan IPCC terhadap suhu dan permukaan laut global. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 22(1), 45–56.
- Barnett, J. (2010). Climate change and human security: Challenging the conventional wisdom. *Regional Environmental Change*, 11(Suppl. 1), 103–114.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (2nd ed.). CRC Press.
- Conant, R. T., Paustian, K., & Elliott, E. T. (2001). Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11(2), 343–355.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- FAO. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: From field measurement to prediction*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201.
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4), 045023.
- Gunarso, P., Hartoyo, M. E., Agus, F., & Killeen, T. J. (2012). Oil palm and land use change in Indonesia, Malaysia and Papua New Guinea. In T. J. Killeen, J. Goon, A. Hooijer, & M. Page (Eds.), *Reports from the Technical Panels of the 2nd Greenhouse Gas Working Group of the Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO)* (pp. 29–63).
- Handiani, D., Fadly, A., & Rahayu, D. A. (2019). Perubahan garis pantai dan kerentanan wilayah pesisir akibat perubahan iklim di Kabupaten Subang. *Jurnal Ilmu Kelautan Tropis*, 21(1), 56–67.

- Hidayati, R. A., & Widyastuti, R. (2020). Emisi karbon dari penggunaan lahan dan perubahan penutup lahan di Indonesia. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 15(2), 101–113.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Jensen, J. R. (2016). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (4th ed.). Pearson Education.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2022). *Statistik Perkebunan Kelapa Sawit dalam Kawasan Hutan Tahun 2022*. Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan dan Tata Lingkungan.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Rehman, A., Yanuartati, Y., & Firdaus, M. (2015). Deforestasi dan ekspansi perkebunan kelapa sawit di Provinsi Riau. *Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Pembangunan*, 4(1), 29–41.
- Ruminta, R., & Handoko, D. D. (2016). Dampak perubahan iklim terhadap curah hujan dan produksi padi. *Jurnal Agroklimat*, 10(1), 33–41.
- Runtunuwu, E., & Kondoh, A. (2008). Analisis perubahan curah hujan dan El Nino di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 9(2), 121–132.
- Schmidhuber, J., & Tubiello, F. N. (2007). Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19703–19708.
- Shafitri, D. E., Susilo, H. D., & Sari, D. P. (2018). Peran hutan dalam menyerap CO₂ dan pengaruhnya terhadap pemanasan global. *Jurnal Lingkungan Hidup Indonesia*, 6(2), 100–108.
- Swails, S., Thompson, J. R., & Silva, L. C. R. (2024). Forest degradation and soil carbon loss: Long-term impacts of deforestation on tropical ecosystems. *Global Environmental Change*, 85, 102786.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264.
- Widodo, S., & Sidik, F. (2018). Pentingnya pelestarian hutan untuk keberlanjutan lingkungan hidup. *Jurnal Konservasi Sumber Daya Alam*, 4(1), 25–33.
- Wildan, D., Latifah, N., & Riyadi, A. (2019). Kesadaran masyarakat terhadap pemanasan global dan mitigasi perubahan iklim. *Jurnal Pendidikan Lingkungan dan Pembangunan Berkelanjutan*, 1(1), 10–20.
- Wirasatriya, A., Sudrajat, A. O., & Susanto, D. (2006). Banjir rob dan penurunan permukaan tanah di Kota Semarang: Studi kasus dampak perubahan iklim. *Jurnal Teknik Sipil*, 13(1), 1–9.