



Bulletin of Scientific Contribution GEOLOGY

Fakultas Teknik Geologi
UNIVERSITAS PADJADJARAN

homepage: <http://jurnal.unpad.ac.id/bsc>
p-ISSN: 1693-4873; e-ISSN: 2541-514X



Volume 24, No.01
April 2026

DINAMIKA TUTUPAN HUTAN PADA LANSKAP PENYANGGA KARST SANGKULIRANG 1990–2020 DAN IMPLIKASINYA TERHADAP PENGELOLAAN KARST

Roni Marudut Situmorang¹ Hendra Santoso²

¹Program Studi Teknologi Geologi, Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung, Jl. Jend. Sudirman No. 623, Bandung 40211

²Program Studi Teknik Geologi, Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur, Jl. Ir. H. Juanda No.15, Samarinda 75124

*Email: roni.situmorang@esdm.go.id

ABSTRACT

The Sangkulirang–Mangkalihat Karst in East Kalimantan represents one of the largest karst landscapes in Southeast Asia, characterized by complex carbonate formations, extensive cave systems, and significant ecological and archaeological values. The sustainability of this karst system is not only controlled by its carbonate lithology but also strongly influenced by the surrounding buffer landscape, which functions as a recharge area regulating hydrological processes. This study aims to analyze the spatiotemporal dynamics of forest cover within the karst buffer landscape during the period 1990–2020 and to evaluate its implications for karst management. The analysis was conducted using multitemporal Landsat imagery processed through the Google Earth Engine (GEE) platform, including cloud masking, median composite generation, and Normalized Difference Moisture Index (NDMI)-based classification. Forest cover was identified using a NDMI derived from near-infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) bands, and spatial extent was calculated for each observation year. The results indicate that forest cover experienced significant fluctuations over the study period. Forest area decreased from 438,259 ha in 1990 to 419,807 ha in 1995 and reached its lowest extent of 181,608 ha in 2000, indicating a period of intensive deforestation. Subsequently, forest cover gradually recovered to 330,405 ha in 2005, remained relatively stable at 313,495 ha in 2010, and increased to 354,042 ha in 2015 and 445,208 ha in 2020, surpassing its initial condition. Spatial analysis reveals that forest loss was predominantly concentrated in non-karst areas located in the southern and southeastern parts of the study area, which are characterized by sedimentary lithology, gentler morphology, and higher accessibility. In contrast, forest cover within carbonate karst areas remained relatively stable due to steep topography, high permeability, and limited land-use suitability. These findings highlight the critical role of buffer landscapes in maintaining karst system stability, particularly in regulating infiltration processes and protecting hydrological balance. The study emphasizes that effective karst management should adopt an integrated landscape approach that includes both core karst zones and surrounding buffer areas. This is consistent with the designation of the Sangkulirang–Mangkalihat region as geological heritage under Ministerial Decree No. 187.K/GL.01/MEM.G/2024, which provides a regulatory framework for sustainable karst conservation and geopark development.

Keywords: Sangkulirang Karst, forest cover change, buffer landscape, Google Earth Engine, karst management

ABSTRAK

Kawasan Karst Sangkulirang–Mangkalihat di Kalimantan Timur merupakan salah satu bentang alam karst terbesar di Asia Tenggara yang memiliki kompleksitas geologi tinggi, sistem gua yang luas, serta nilai ekologis dan arkeologis yang penting. Keberlanjutan sistem karst tidak hanya ditentukan oleh litologi karbonat, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi lanskap penyangga yang berfungsi sebagai daerah imbuhan air dan pengontrol proses hidrologi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika spasial dan temporal tutupan hutan pada lanskap penyangga karst selama periode 1990–2020 serta implikasinya terhadap pengelolaan kawasan karst. Analisis dilakukan menggunakan citra Landsat multitemporal berbasis Google Earth Engine (GEE) melalui tahapan masking awan, komposit median, dan klasifikasi berbasis *Normalized Difference Moisture Index (NDMI)*. Identifikasi tutupan hutan dilakukan menggunakan NDMI yang sensitif terhadap kandungan air berbasis kanal near-infrared (NIR)

dan shortwave infrared (SWIR), kemudian luas tutupan hutan dihitung untuk setiap periode pengamatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tutupan hutan mengalami dinamika fluktuatif selama periode pengamatan. Luas hutan menurun dari 438.259 ha pada tahun 1990 menjadi 419.807 ha pada tahun 1995, dan mencapai titik terendah sebesar 181.608 ha pada tahun 2000 yang mencerminkan fase deforestasi intensif. Setelah periode tersebut, tutupan hutan mengalami pemulihan bertahap hingga mencapai 330.405 ha pada tahun 2005, relatif stabil pada 313.495 ha pada tahun 2010, dan meningkat menjadi 354.042 ha pada tahun 2015 serta 445.208 ha pada tahun 2020 melampaui kondisi awal. Analisis spasial menunjukkan bahwa perubahan tutupan hutan lebih dominan terjadi pada wilayah non-karbonat di bagian selatan dan tenggara yang memiliki morfologi lebih landai dan aksesibilitas tinggi. Sebaliknya, kawasan karst berbatuan karbonat menunjukkan tutupan hutan yang relatif stabil akibat topografi terjal dan keterbatasan pemanfaatan lahan. Temuan ini menegaskan bahwa lanskap penyangga memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas sistem karst, terutama dalam mengontrol proses infiltrasi dan keseimbangan hidrologi. Oleh karena itu, pengelolaan kawasan karst perlu dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan keterkaitan antara zona inti karst dan lanskap penyangganya. Hal ini sejalan dengan penetapan kawasan sebagai warisan geologi melalui Kepmen ESDM No. 187.K/GL.01/MEM.G/2024 yang menjadi dasar dalam pengelolaan karst secara berkelanjutan.

Kata Kunci : Karst Sangkulirang, tutupan hutan, lanskap penyangga, Google Earth Engine, pengelolaan karst

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kawasan karst terbentuk pada batuan karbonat seperti batugamping yang mengalami proses pelarutan oleh air bersifat asam sehingga menghasilkan bentang alam khas berupa gua, dolina, dan sistem aliran bawah tanah (Ford dan Williams, 2007). Proses pelarutan tersebut juga menyebabkan terbentuknya rongga dan rekahan yang dapat berkembang menjadi sistem gua karst (Santoso dan Situmorang, 2023). Secara global, kawasan karst mencakup sekitar 15% permukaan daratan bumi dan berperan penting sebagai penyimpan serta pengatur sumber daya air tanah (Goldscheider et al., 2020).

Tutupan vegetasi pada kawasan karst memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas sistem hidrologi dan ekologi. Vegetasi hutan meningkatkan infiltrasi air hujan, mengurangi limpasan permukaan, serta menekan laju erosi. Sebaliknya, perubahan tutupan lahan terutama akibat deforestasi dapat mengganggu keseimbangan sistem hidrologi karst yang sensitif terhadap perubahan kondisi permukaan (White, 1988; Ford dan Williams, 2007). Oleh karena itu, dinamika tutupan hutan pada wilayah sekitar karst menjadi faktor penting dalam keberlanjutan sistem karst.

Karst Sangkulirang–Mangkalihat di Kalimantan Timur merupakan salah satu bentang alam karst terbesar di Asia Tenggara dengan luas sekitar 1,8 juta hektare (Balai Pelestarian Cagar Budaya Kaltim, 2016). Kawasan ini tersusun oleh perbukitan batugamping dengan sistem gua yang berkembang luas serta jaringan hidrologi bawah tanah yang kompleks (Chazine, 2005; Erwandha dan Sulton, 2021). Selain itu,

kawasan ini memiliki nilai arkeologi tinggi karena keberadaan lukisan cadas prasejarah yang berumur hingga ± 40.000 tahun (Aubert et al., 2018).

Keberlanjutan sistem karst tidak hanya ditentukan oleh kondisi batuan karbonat, tetapi juga oleh kondisi lanskap di sekitarnya. Wilayah non-karst berfungsi sebagai daerah tangkapan air yang mengontrol infiltrasi menuju sistem akuifer karst. Perubahan tutupan lahan pada wilayah penyangga tersebut dapat mempengaruhi keseimbangan hidrologi dan stabilitas ekosistem karst (White, 1988).

Penelitian mengenai Karst Sangkulirang–Mangkalihat umumnya berfokus pada aspek geologi, speleologi, dan arkeologi, sementara kajian mengenai dinamika tutupan hutan pada lanskap penyangga karst masih terbatas. Padahal, perubahan tutupan hutan pada wilayah penyangga berpotensi memberikan dampak signifikan terhadap sistem hidrologi karst. Keterbatasan ini menunjukkan adanya kebutuhan untuk menganalisis dinamika tutupan hutan secara spasial dan temporal pada lanskap penyangga karst Sangkulirang.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh memungkinkan analisis perubahan tutupan lahan dalam jangka panjang. Google Earth Engine (GEE) menyediakan akses terhadap data citra satelit multitemporal serta kemampuan komputasi skala besar untuk analisis perubahan lingkungan (Gorelick et al., 2017). Dalam beberapa tahun terakhir, GEE juga banyak digunakan dalam studi karst untuk memantau dinamika vegetasi dan perubahan penggunaan lahan (Jiang et al., 2020; Yi et al., 2025).

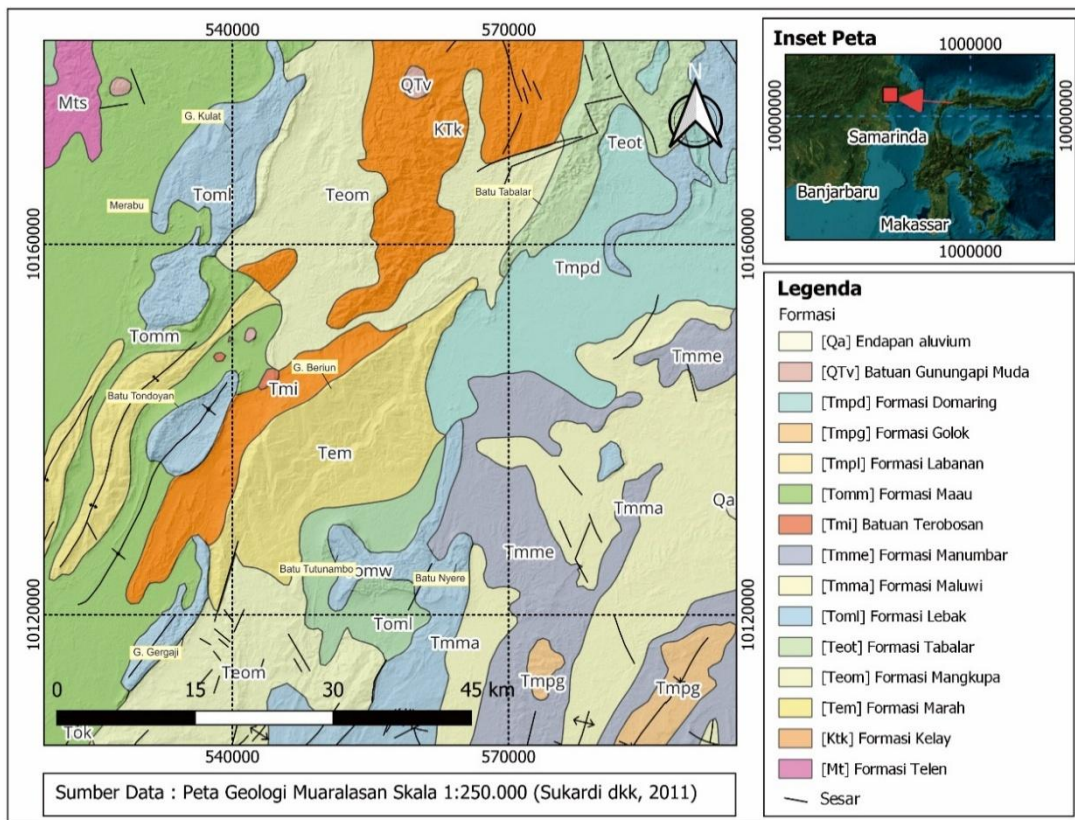
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika perubahan tutupan hutan pada lanskap penyangga Karst Sangkulirang

selama periode 1990–2020 menggunakan citra Landsat berbasis Google Earth Engine. Analisis ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pola perubahan tutupan hutan serta implikasinya terhadap pengelolaan kawasan karst secara berkelanjutan.

Geologi Wilayah Penelitian

Wilayah penelitian terletak pada bagian timur Pulau Kalimantan yang termasuk dalam

Semenanjung Mangkalihit dan merupakan bagian dari sistem sedimentasi Cekungan Kutai. Cekungan ini berkembang sejak Mesozoikum hingga Kenozoikum sebagai hasil aktivitas tektonik yang menghasilkan akumulasi sedimen laut dangkal hingga laut dalam (Hall, 2012). Proses tersebut membentuk satuan batuan karbonat dan sedimen yang berperan dalam perkembangan bentang alam karst di kawasan Sangkulirang.



Gambar 1. Peta geologi wilayah penelitian yang menunjukkan distribusi satuan batuan di sekitar lanskap penyangga Karst Sangkulirang (Sukardi et al., 2011)

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Muaralasan skala 1:250.000 (Sukardi et al., 2011), wilayah penelitian tersusun oleh satuan batuan berumur Tersier hingga Kuartar yang meliputi Formasi Domaring (Tmpe), Golok (Tmpe), Labanan (Tmpl), Mangkupa (Teom), Tabalar (Teot), Marah (Tem), dan Manumbar (Tmme), serta endapan aluvial (Qa) pada dataran rendah (Gambar 1).

Formasi Tabalar dan Mangkupa merupakan satuan batuan karbonat yang tersusun oleh batugamping dan berperan sebagai penyusun utama bentang alam karst Sangkulirang–Mangkalihit. Batuan karbonat ini mengalami proses pelarutan intensif sehingga membentuk morfologi karst berupa perbukitan curam, dolina, serta sistem gua dan aliran bawah tanah (Ford dan Williams, 2007; Purnama et al., 2025). Karakteristik topografi yang curam serta permeabilitas

tinggi menyebabkan wilayah ini relatif sulit dimanfaatkan, sehingga tutupan hutan pada kawasan karst utama cenderung lebih stabil. Sebaliknya, satuan batuan sedimen non-karbonat seperti Formasi Golok dan Labanan yang tersusun oleh batupasir, batulempung, dan batulanau berkembang pada wilayah dengan morfologi yang lebih landai. Kondisi ini menjadikan wilayah non-karst lebih mudah diakses dan dimanfaatkan untuk berbagai aktivitas penggunaan lahan seperti perkebunan dan permukiman.

Perbedaan litologi tersebut menghasilkan kontras morfologi antara perbukitan karst dan dataran sedimen yang berfungsi sebagai lanskap penyangga. Lanskap penyangga ini memiliki peran penting sebagai daerah tangkapan air yang mengontrol infiltrasi menuju sistem akuifer karst. Kondisi topografi yang lebih landai dan aksesibilitas

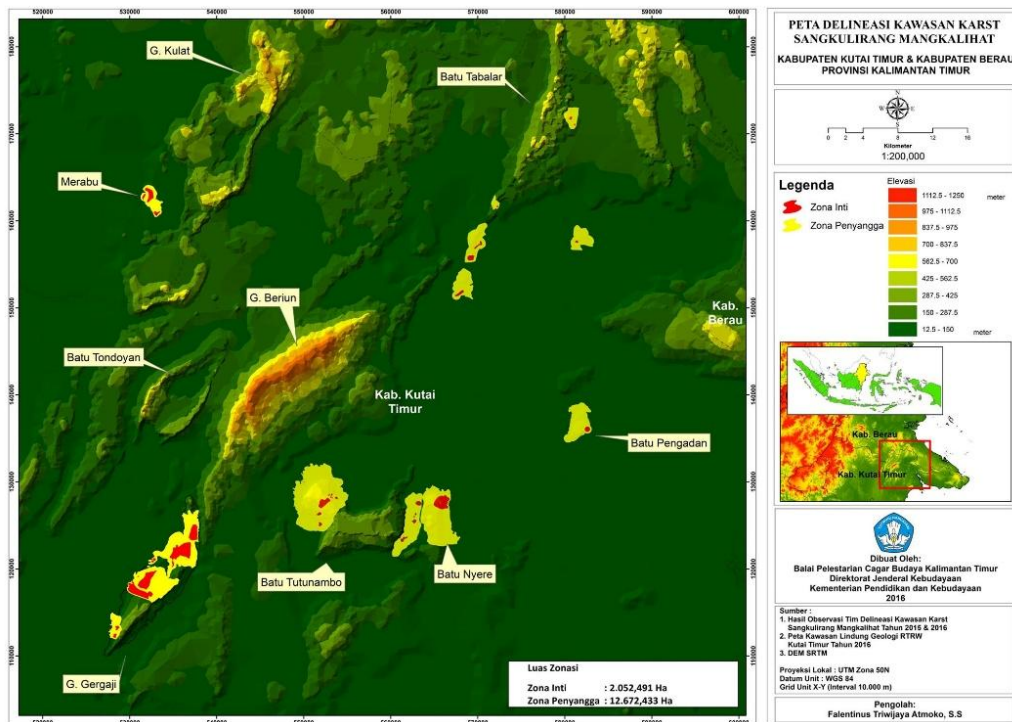
yang tinggi menyebabkan wilayah ini lebih rentan terhadap perubahan tutupan hutan dibandingkan kawasan karst utama. Kondisi geologi tersebut menunjukkan bahwa dinamika perubahan tutupan hutan pada wilayah penelitian sangat dipengaruhi oleh karakteristik litologi dan morfologi. Kawasan karst yang tersusun oleh batuan karbonat cenderung mempertahankan tutupan hutan, sedangkan wilayah penyangga yang tersusun oleh batuan sedimen non-karbonat lebih rentan terhadap deforestasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan penginderaan jauh berbasis GEE untuk menganalisis dinamika perubahan tutupan hutan pada kawasan penyangga Karst Sangkulirang periode 1990–2020. Data yang digunakan berupa citra Landsat

multitemporal (Landsat 4, 5, 7, 8, dan 9) dengan resolusi spasial 30 meter.

Secara geomorfologi, wilayah penelitian terdiri atas kombinasi bentang alam karst, perbukitan struktural, serta dataran aluvial yang berkembang pada satuan batuan karbonat dan sedimen Tersier di Cekungan Kutai. Kawasan ini memiliki sistem hidrologi yang kompleks karena interaksi antara infiltrasi air pada batuan karbonat dengan sistem drainase permukaan pada wilayah non-karst. Secara koordinat *Universal Transverse Mercator*, batas wilayah Penyangga Karst di Wilayah Sangkulirang yang dimaksud dalam penelitian pada 518000-601000 mE dan 106000-182000 mU dengan topografi yang didominasi perbukitan karst dan hutan tropis dataran rendah (lihat Gambar 2).



Gambar 2. Lokasi penelitian pada lanskap penyangga Karst Sangkulirang–Mangkalihat di Kalimantan Timur (Atmoko, 2016 dalam Balai Pelestarian Cagar Budaya Kaltim, 2016).

1. Pendekatan Multitemporal

Analisis dilakukan menggunakan pendekatan multitemporal dengan asumsi bahwa karakteristik permukaan (*surface reflectance*) relatif stabil dalam jangka waktu tertentu, sedangkan perubahan signifikan umumnya disebabkan oleh gangguan seperti awan atau perubahan tutupan lahan (Mateo-Garcia et al., 2018).

Pendekatan ini memungkinkan peningkatan kualitas data dengan memanfaatkan informasi temporal untuk mengurangi noise akibat awan serta meningkatkan akurasi deteksi perubahan tutupan hutan.

2. Pengolahan Data Citra

Pengolahan citra dilakukan secara bertahap melalui proses *filtering*, *cloud masking* (penghilangan awan), komposit citra, perhitungan Normalized Difference Moisture Index (NDMI), dan klasifikasi tutupan hutan.

a. Filtering dan Komposit Citra

Citra difilter berdasarkan batas wilayah penelitian dan periode waktu pengamatan. Untuk setiap tahun analisis (1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, dan 2020), digunakan rentang komposit multitemporal selama ±1 tahun dari tahun target.

Komposit citra dilakukan menggunakan metode median untuk menghasilkan

representasi citra yang stabil terhadap gangguan atmosfer dan variasi temporal. Pendekatan median ini terbukti efektif dalam mengurangi pengaruh awan dan noise pada analisis multitemporal

3. Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

Identifikasi tutupan hutan dilakukan menggunakan *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) yang sensitif terhadap kandungan air dalam vegetasi.

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

di mana: NIR = *Near Infrared*; SWIR = *Shortwave Infrared*. Perhitungan NDMI dilakukan pada citra Landsat yang telah melalui proses masking awan (cloud masking), komposit median multitemporal, serta koreksi reflektansi permukaan menggunakan faktor skala standar Landsat *Collection 2*.

Proses komposit dilakukan dengan menggabungkan citra dalam rentang ± 1 tahun dari tahun target untuk menghasilkan citra representatif yang stabil terhadap gangguan atmosfer dan variabilitas temporal. Klasifikasi tutupan hutan dilakukan menggunakan pendekatan *threshold-based classification*, di mana piksel diklasifikasikan sebagai hutan apabila memiliki nilai NDMI lebih besar dari 0,7 (NDMI > 0,7). Nilai ambang ini dipilih berdasarkan pendekatan empiris yang dikalibrasi melalui interpretasi visual citra serta karakteristik spektral vegetasi tropis yang memiliki kandungan air tinggi. Implementasi klasifikasi dilakukan pada platform Google Earth Engine menggunakan fungsi ekspresi sebagai berikut:

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

dan

$$Forest = VI > 0.7$$

Pendekatan ini memungkinkan identifikasi vegetasi rapat secara konsisten pada skala regional, khususnya pada ekosistem hutan tropis lembab yang memiliki nilai NDMI relatif tinggi. Nilai ambang NDMI (> 0,7) ditentukan berdasarkan pendekatan empiris melalui interpretasi visual citra dan distribusi nilai NDMI pada area referensi, di mana vegetasi hutan tropis dengan kerapatan tinggi umumnya menunjukkan nilai NDMI yang lebih tinggi dibandingkan vegetasi jarang atau lahan terbuka (Gao, 1996; Wilson dan Sader, 2002; Jin dan Sader, 2005).

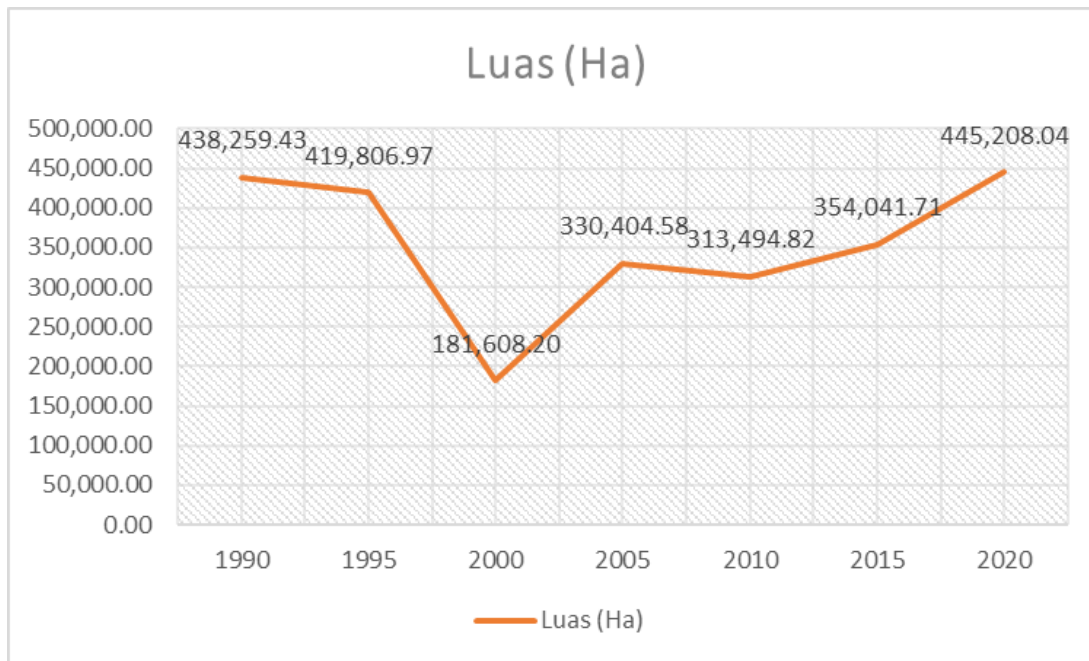
4. Analisis Perubahan Tutupan Hutan

Perubahan tutupan hutan dianalisis secara temporal dan spasial. (1) Analisis temporal dilakukan dengan menghitung luas tutupan hutan pada setiap periode pengamatan menggunakan jumlah piksel yang dikonversi ke hektare. (2) Analisis spasial dilakukan dengan memetakan distribusi perubahan tutupan hutan untuk mengidentifikasi pola deforestasi pada lanskap penyangga karst. Pendekatan multitemporal memungkinkan deteksi perubahan yang lebih konsisten karena memanfaatkan stabilitas relatif permukaan dibandingkan perubahan akibat gangguan sementara seperti awan (Mateo-Garcia et al., 2018).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Dinamika Temporal Tutupan Hutan

Analisis menunjukkan bahwa luas tutupan hutan pada kawasan penyangga Karst Sangkulirang mengalami fluktuasi signifikan selama periode 1990–2020. Luas hutan tercatat sebesar 438.259,43 ha pada tahun 1990, kemudian menurun menjadi 419.806,97 ha (1995) dan mengalami penurunan drastis hingga 181.608,20 ha pada tahun 2000. Setelah periode tersebut, terjadi peningkatan kembali menjadi 330.404,58 ha (2005), relatif stabil pada 313.494,82 ha (2010), meningkat menjadi 354.041,71 ha (2015), dan mencapai 445.208,04 ha pada tahun 2020.



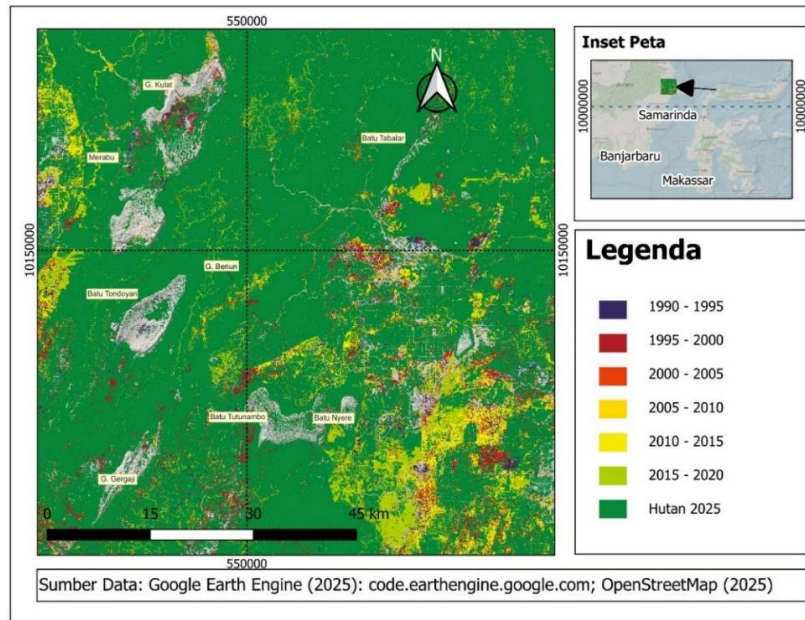
Gambar 3. Grafik perubahan luas tutupan hutan pada lanskap penyangga Karst Sangkulirang periode 1990–2020.

Penurunan paling signifikan terjadi pada periode 1995–2000 dengan kehilangan hutan sebesar 238.198,77 ha, yang mengindikasikan fase deforestasi intensif. Sebaliknya, periode 2000–2020 menunjukkan tren pemulihan dengan peningkatan total sebesar 263.599,84 ha, bahkan melampaui kondisi awal tahun 1990. Pola ini mencerminkan dinamika tekanan dan pemulihan ekosistem yang umum terjadi pada lanskap tropis, di mana deforestasi awal diikuti oleh proses regenerasi alami maupun intervensi pengelolaan (Hansen et al., 2013)

Pola Spasial Perubahan Tutupan Hutan

Analisis spasial menunjukkan bahwa perubahan tutupan hutan pada kawasan penyangga Karst Sangkulirang tidak hanya berupa penurunan luas vegetasi, tetapi juga mencerminkan transformasi penggunaan lahan menjadi perkebunan kelapa sawit, area pertambangan, dan permukiman yang

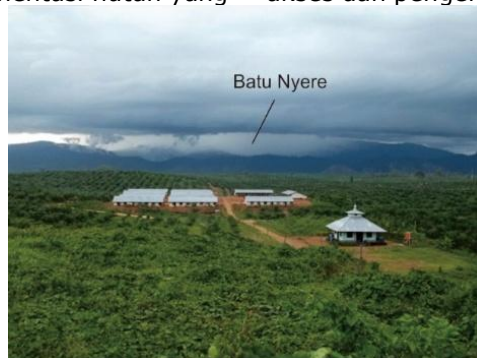
berkembang secara terarah baik secara spasial maupun temporal. Distribusi perubahan tidak homogen, melainkan terkonsentrasi pada zona tertentu yang memiliki aksesibilitas tinggi dan kondisi topografi yang lebih landai dibandingkan kawasan karst inti. Perubahan paling dominan teridentifikasi pada bagian timur hingga tenggara wilayah studi, yang secara geografis berada di luar zona inti karst dan berasosiasi dengan dataran rendah. Area ini memperlihatkan intensitas perubahan tinggi pada periode 1995–2015 yang ditandai oleh warna merah hingga kuning, kemudian diikuti oleh fase penutupan kembali sebagian lahan pada periode 2015–2020 yang ditunjukkan oleh warna hijau terang. Pola ini mengindikasikan adanya siklus pembukaan lahan, pemanfaatan, dan revegetasi parsial yang berlangsung secara dinamis.



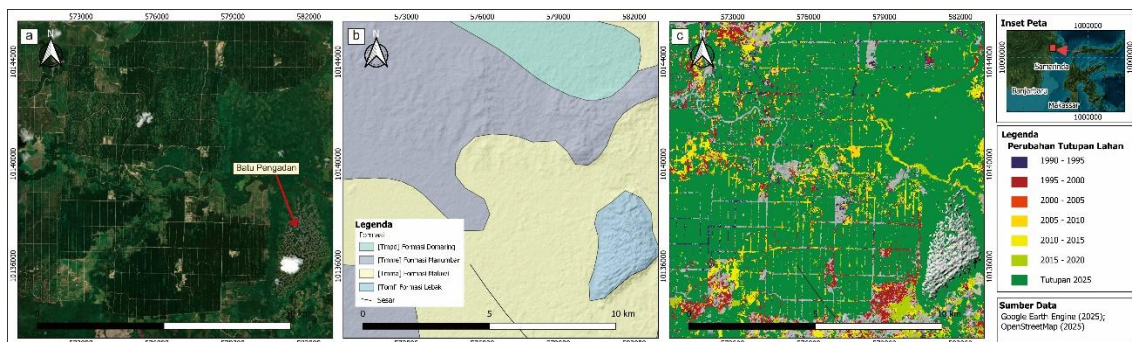
Gambar 4. Peta dinamika perubahan tutupan hutan pada lanskap penyangga Karst Sangkulirang periode 1990–2020 berdasarkan analisis citra Landsat berbasis GEE.

Transformasi menjadi perkebunan kelapa sawit menunjukkan pola spasial yang teratur dan geometris, dengan bentuk blok-blok yang mengikuti jaringan jalan dan batas administratif lahan (lihat Gambar 5). Pola grid yang konsisten serta fragmentasi hutan yang

terstruktur menunjukkan bahwa konversi lahan berlangsung secara terorganisir dalam skala industri (lihat Gambar 6). Ekspansi ini terutama berkembang pada wilayah dengan kemiringan rendah, sehingga memudahkan akses dan pengelolaan lahan secara mekanis.



Gambar 5. Perubahan tutupan hutan pada bagian timur laut Batu Nyere (Barat Batu Pengadan), Kampung Baay, Karangan, Kutai Timur (Dokumentasi Tahun 2020)



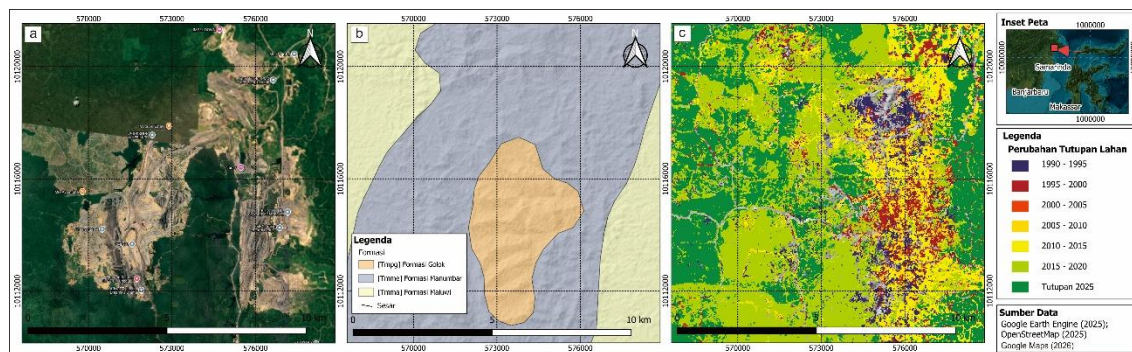
Gambar 6. Pola Spasial Kebun Kelapa Sawit dan Permukiman di barat Batu Pengadan (timur laut Batu Nyere), Kampung Baay, Kecamatan Karangan Kabupaten Kutai Timur. (a) Citra Satelit *Google Earth* PT Telen Tahun 2025; (b) Peta Geologi Regional (Sukardi et al., 2011); (c) Peta Dinamika perubahan tutupan lahan hutan menjadi Kebun Kelapa Sawit dilokasi yang sama periode 1990–2020 berdasarkan analisis citra Landsat berbasis GEE.

Perkembangan permukiman dan infrastruktur menunjukkan pola linier yang mengikuti koridor jalan utama (lihat Gambar 6). Perubahan ini ditandai oleh kemunculan klaster-klaster kecil yang berkembang secara bertahap dan berfungsi sebagai penghubung antara pusat aktivitas ekonomi dengan wilayah hutan. Meskipun luasnya relatif lebih kecil dibandingkan perkebunan dan pertambangan, keberadaan permukiman berkontribusi terhadap fragmentasi lanskap dan peningkatan akses ke wilayah hutan yang sebelumnya terisolasi. Aktivitas pertambangan memperlihatkan karakter spasial yang lebih tidak beraturan dengan kontras spektral tinggi. Area tambang

ditandai oleh bukaan lahan yang luas (lihat Gambar 7), tekstur kasar akibat material overburden, serta keberadaan kolam air yang terbentuk dari pit tambang. Distribusi spasialnya banyak ditemukan pada bagian timur hingga tenggara wilayah penelitian, yang menunjukkan keterkaitan dengan jaringan jalan dan lokasi sumber daya. Pola perubahan pada area ini menunjukkan tahapan bertahap yang khas, dimulai dari pembukaan hutan, aktivitas ekstraksi, hingga tahap reklamasi parsial, sebagaimana dijelaskan dalam proses pertambangan terbuka (Prasetya dan Tsai, 2025).



Gambar 7. Perubahan tutupan hutan pada bagian tenggara Batu Nyere, Kampung Cilendek Barat, Kaubun, Kutai Timur (Dokumentasi Tahun 2026).



Gambar 8. Pola Spasial Tambang Terbuka di tenggara Batu Nyere (barat daya Batu Pengadan), Kampung Cilendek Barat, Kaubun, Kutai Timur. (a) Citra Satelit *Google Satelit* Tahun 2026; (b) Peta Geologi Regional (Sukardi et al., 2011); (c) Peta Dinamika perubahan tutupan lahan hutan menjadi Wilayah Tambang dilokasi yang sama periode 1990–2020 berdasarkan analisis citra Landsat berbasis GEE.

Pada bagian tenggara Inti Karst Batu Nyere, terdapat lahan terbuka, yang merupakan wilayah pertambangan yang masih sangat dinamis (lihat Gambar 8a). Peta Citra Satelit yang digunakan untuk interpretasi adalah

Citra Google Satelit terbaru tahun 2026, yang mana memperlihatkan adanya penambahan pembukaan wilayah PIT Terbuka pada Formasi Manubar (Tmme) dibagian barat dari Formasi Golok (Tmpg) yang tidak

ditambang (lihat Gambar 8b). Formasi Manumbar (Tmme) memiliki pembawa Batubara, sedangkan Formasi Golok merupakan hasil endapan yang didominasi Batugamping.

Pada Peta dinamika Tutupan Hutan yang dilakukan dari tahun 1990–2020 (lihat Gambar 8c), dan Tutupan pada 2025, diketahui bahwa penambangan dimulai pada Sisi Timur Bukit Formasi Golok, lalu mulai terjadi pembersihan lahan pada rentang tahun 2015-2020. Sedangkan pada bagian Barat Bukit Formasi Golok, diketahui pada Tanggal 13 Maret 2026, telah menjadi wilayah pertambangan terbuka batubara, termasuk *Workshop* alat berat, hunian pekerja, jalan, kolam dan PIT Terbuka (lihat Gambar 7).

Hal ini mengindikasikan adanya perubahan tutupan lahan yang masif dan dalam waktu cepat pada wilayah pertambangan, sehingga menghasilkan pola dinamika multitemporal tutupan lahan yang berantakan. Kegiatan penambangan terbuka pada wilayah dekat Inti Karst Batu Nyere dan Bukit Formasi Golok (Batugamping), mengindikasikan masih terdapat penambangan yang sangat dekat dengan Zona inti Karst Sangkulirang.

Wilayah bagian utara dan barat laut yang mencakup kawasan karst utama seperti Gunung Kulat, Batu Tabalar, dan Merabu menunjukkan tingkat perubahan yang sangat rendah. Area ini tetap didominasi oleh tutupan hutan yang stabil hingga tahun 2020, yang dipengaruhi oleh kondisi morfologi karst yang terjal, keterbatasan aksesibilitas, serta status perlindungan kawasan. Stabilitas ini menegaskan peran kawasan karst inti sebagai zona konservasi yang relatif tidak terganggu dibandingkan wilayah penyangga di sekitarnya.

Secara keseluruhan, pola spasial perubahan tutupan hutan membentuk konfigurasi lanskap yang khas, di mana ekspansi perkebunan ditandai oleh pola teratur, aktivitas pertambangan oleh pola tidak beraturan dengan gangguan intensif, dan permukiman oleh pola linier. Distribusi ini menunjukkan bahwa dinamika tutupan hutan pada kawasan penyangga karst dikendalikan oleh kombinasi faktor aksesibilitas, kondisi geologi, dan tekanan pemanfaatan lahan. Pendekatan multitemporal berbasis citra satelit memungkinkan identifikasi pola-pola tersebut secara sistematis, sehingga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap dinamika lanskap di kawasan Karst Sangkulirang.

3. Keterkaitan Litologi Karbonat dan Dinamika Tutupan Hutan

Distribusi spasial perubahan tutupan hutan pada lanskap penyangga Karst Sangkulirang

menunjukkan keterkaitan yang kuat dengan kondisi geologi, khususnya perbedaan litologi antara batuan karbonat dan non-karbonat. Hasil analisis mengindikasikan bahwa wilayah yang tersusun oleh batuan karbonat, seperti Formasi Tabalar dan Mangkupa, memiliki tingkat perubahan tutupan hutan yang relatif rendah dibandingkan wilayah dengan litologi sedimen klastik di sekitarnya.

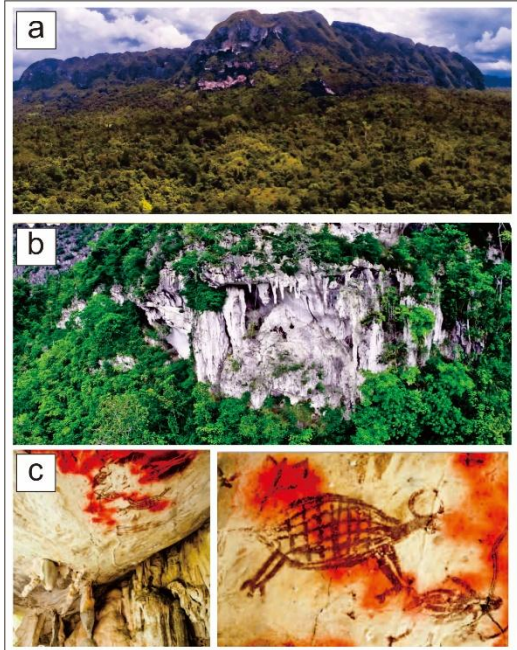
Stabilitas tutupan hutan pada kawasan karbonat tidak hanya disebabkan oleh faktor litologi secara langsung, tetapi juga merupakan hasil interaksi antara sifat fisik batuan, morfologi, dan sistem hidrologi karst. Batuan karbonat yang mengalami proses pelarutan intensif membentuk morfologi karst dengan lereng curam, relief terjal, serta sistem drainase bawah permukaan yang dominan. Kondisi ini menyebabkan keterbatasan perkembangan jaringan sungai permukaan serta rendahnya ketersediaan tanah berkembang (*soil development*), sehingga secara alami menghambat aktivitas konversi lahan dalam skala besar.

Permeabilitas tinggi pada batuan karbonat meningkatkan infiltrasi air secara cepat ke dalam sistem akuifer karst, sehingga mengurangi pembentukan aliran permukaan yang biasanya menjadi faktor penting dalam pembukaan lahan untuk pertanian atau perkebunan. Kombinasi antara topografi terjal, aksesibilitas rendah, dan kondisi hidrologi tersebut menjadikan kawasan karst sebagai zona yang relatif terlindungi secara alami terhadap tekanan deforestasi.

Wilayah non-karbonat yang berkembang pada Formasi Golok, Labanan, dan Manumbar menunjukkan dinamika perubahan tutupan hutan yang jauh lebih tinggi. Litologi sedimen klastik yang didominasi oleh batupasir, batulempung, dan batulanau menghasilkan morfologi yang lebih landai dengan perkembangan tanah yang lebih baik, sehingga meningkatkan kesesuaian lahan untuk aktivitas antropogenik seperti perkebunan kelapa sawit, pertambangan, dan permukiman. Kondisi ini menjadikan wilayah penyangga sebagai zona transisi yang sangat dinamis dan rentan terhadap deforestasi.

Keterkaitan antara litologi dan dinamika tutupan hutan ini semakin diperkuat oleh observasi pada skala lokal di kawasan Batu Nyere, khususnya pada area Ceruk Banteng, Kawasan Karst Nyere (lihat Gambar 9). Ceruk Banteng berkembang pada satuan batugamping dengan morfologi tebing karst yang curam dan sistem gua yang intensif (lihat Gambar 9b). Ceruk Banteng, yang dikenal sebagai situs lukisan cadas prasejarah (lihat Gambar 9c), dengan lukisan gambar Fauna tidak proporsional dari kura-kura, monyet, buaya dan banteng, berada pada zona tebing karst yang relatif sulit

diakses dan masih mempertahankan tutupan vegetasi alami di sekitarnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa faktor geomorfologi yang dikontrol oleh litologi karbonat berperan penting dalam menjaga integritas tutupan hutan sekaligus melindungi nilai geoheritage dan arkeologi kawasan.



Gambar 9. Litologi Karbonat Wilayah Batu Nyere. (a) Lanskap Kawasan Karst Batu Nyere dari arah Tenggara; (b) Kawasan Ceruk Banteng, Karst Batu Nyere; dan (c) Gambar Fauna pada dinding bagian atas Gua Ceruk Banteng (Dokumentasi Balai Pelestarian Cagar Budaya Kalimantan Timur, 2016).

Wilayah di sekitar kaki bukit karst Batu Nyere yang tersusun oleh litologi non-karbonat menunjukkan perubahan tutupan lahan yang signifikan, terutama akibat ekspansi pertambangan batubara dan pembukaan lahan untuk perkebunan. Transisi yang kontras antara zona inti karst dan wilayah penyangga ini menegaskan bahwa batas litologi secara tidak langsung berfungsi sebagai batas ekologis (*ecological boundary*) yang mengontrol distribusi tekanan antropogenik terhadap lanskap.

Litologi karbonat tidak hanya berperan sebagai faktor pembentuk bentang alam karst, tetapi juga sebagai pengontrol utama dalam menentukan pola spasial dinamika tutupan hutan. Kawasan karst berfungsi sebagai refugia ekologis yang relatif stabil, sementara wilayah penyangga non-karbonat menjadi zona yang paling rentan terhadap perubahan. Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan berbasis geologi dalam analisis perubahan tutupan lahan,

terutama dalam konteks pengelolaan lanskap karst yang berkelanjutan

4. Peran Lanskap Penyangga terhadap Stabilitas Karst Sangkulirang

Lanskap penyangga berperan penting dalam menjaga stabilitas sistem karst, terutama sebagai daerah tangkapan air yang mengontrol infiltrasi menuju akuifer karst. Berbeda dengan kawasan inti karst yang didominasi aliran bawah permukaan, wilayah penyangga yang tersusun oleh litologi non-karbonat menjadi sumber utama imbuhan air.

Penurunan tutupan hutan pada periode 1995–2000 berpotensi menurunkan kapasitas infiltrasi dan meningkatkan limpasan permukaan, yang dapat mengganggu keseimbangan hidrologi karst. Sebaliknya, peningkatan tutupan hutan setelah tahun 2000 menunjukkan pemulihan fungsi hidrologi melalui peningkatan infiltrasi dan stabilitas tanah.

Kondisi ini terlihat jelas pada zona transisi di sekitar Batu Nyere, di mana aktivitas pertambangan dan pembukaan lahan pada wilayah non-karbonat berpotensi mengganggu sistem imbuhan ke kawasan karst, termasuk area bernilai arkeologi seperti Ceruk Banteng.

Selain fungsi hidrologi, lanskap penyangga juga berperan sebagai pelindung ekologis yang membatasi tekanan antropogenik terhadap kawasan karst inti. Oleh karena itu, stabilitas karst Sangkulirang sangat bergantung pada kondisi tutupan hutan di wilayah penyangganya, sehingga pengelolaan kawasan perlu dilakukan secara terintegrasi berbasis lanskap.

5. Implikasi terhadap Pengelolaan dan Regulasi Karst

Penetapan kawasan karst Sangkulirang–Mangkalihat sebagai warisan geologi (geoheritage) melalui Kepmen ESDM No. 187.K/GL.01/MEM.G/2024 memberikan dasar hukum yang kuat dalam pengelolaan kawasan karst secara terpadu, khususnya pada wilayah Kabupaten Kutai Timur. Dalam keputusan tersebut, sejumlah geosite yang berada di Kecamatan Karang telah ditetapkan secara resmi, antara lain Danau Tebo, Gua Kambing, Gua Ambulabung, Gua Amanas, Gua Timung, Gua Mengkuris, dan Gua Rimba.

Keberadaan geosite tersebut menunjukkan bahwa wilayah Karang dan Batu Lepoq merupakan zona inti karst yang memiliki nilai geologi, hidrologi, dan speleologi tinggi. Sementara itu, wilayah Kaibun–Kaliorang yang berada di bagian selatan–tenggara berfungsi sebagai lanskap penyangga yang

secara hidrologis berperan sebagai daerah imbuhan bagi sistem akuifer karst.

Perubahan tutupan hutan lebih dominan terjadi pada wilayah non-karst di bagian selatan dan tenggara, yang secara spasial berkorespondensi dengan area penyangga seperti Kaubun dan sekitarnya. Hal ini memiliki implikasi penting, karena meskipun geosite utama berada di Karang, stabilitas sistem karst sangat dipengaruhi oleh kondisi lanskap penyangga tersebut.

Secara regulatif, Kepmen ESDM No. 187.K/GL.01/MEM.G/2024 menegaskan bahwa warisan geologi dapat dijadikan acuan dalam pemanfaatan ruang dan pengembangan geopark. Namun demikian, regulasi ini masih berfokus pada deliniasi dan penetapan geosite, sehingga implikasi terhadap pengelolaan wilayah penyangga belum dijabarkan secara rinci. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mengindikasikan perlunya pendekatan pengelolaan karst yang tidak hanya berbasis pada zona inti, tetapi juga mencakup perlindungan lanskap penyangga.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa tutupan hutan pada lanskap penyangga Karst Sangkulirang mengalami dinamika fluktuatif selama periode 1990–2020, dengan fase deforestasi intensif pada akhir 1990-an yang diikuti oleh pemulihan hingga tahun 2020. Perubahan tutupan hutan terutama terjadi pada wilayah non-karbonat di bagian selatan dan tenggara yang berperan sebagai lanskap penyangga sistem karst.

Temuan ini menegaskan bahwa stabilitas sistem karst tidak hanya ditentukan oleh kawasan inti karbonat, tetapi sangat bergantung pada kondisi lanskap penyangga yang mengontrol proses hidrologi, khususnya infiltrasi dan imbuhan air tanah. Sejalan dengan Kepmen ESDM No. 187.K/GL.01/MEM.G/2024, pengelolaan karst perlu dilakukan secara terpadu dengan mengintegrasikan perlindungan zona inti dan lanskap penyangga untuk menjaga keberlanjutan sistem karst secara jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada Ahmad Dzakwan Sa'd atas kontribusinya dalam kegiatan dokumentasi lapangan yang sangat membantu dalam proses pengumpulan data. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Balai Pelestarian Cagar Budaya Kalimantan Timur atas peran pentingnya

dalam kegiatan pemetaan gua di kawasan Karst Sangkulirang–Mangkalihat, yang menjadi bagian awal dari upaya pengembangan dan pengusulan kawasan ini sebagai *UNESCO Global Geopark* (UGGp).

REFERENSI

- Aubert, M., Setiawan, P., Oktaviana, A.A., Brumm, A., Sulistyarto, P.H., Saptomo, E.W., Istiawan, B., Ma'ruf, A., Wahyuono, V.N., Atmoko, F.T., Zhao, J.X., Huntley, J., Taçon, P.S.C., 2018. Palaeolithic cave art in Borneo. *Nature* 564, 254–257. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0679-9>
- Balai Pelestarian Cagar Budaya Kaltim, 2016. Kawasan Karst Sangkulirang Mangkalihat. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Direktorat Jenderal Kebudayaan.
- Chazine, J.M., 2005. Rock art, burials and habitations: caves in East Kalimantan. *Asian Perspectives* 44, 219–230. <https://doi.org/10.1353/asi.2005.0006>
- Erwandha, R., Sulton, M. N. 2021., Analysis of Characteristics, Functions, and Problems in Karst Sangkulirang-Mangkalihat Region. *Journal of Global Environmental Dynamics*, 2(1), 19-24.
- Ford, D., Williams, P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Galiatsatos, N., Donoghue, D. N., Watt, P., Bholanath, P., Pickering, J., Hansen, M. C., Mahmood, A. R., 2020. An assessment of global forest change datasets for national forest monitoring and reporting. *Remote Sensing*, 12(11), 1790.
- Gao, B. C., 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Stevanovic, Z., Veni, G., 2020. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeology Journal* 28, 1661–1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hall, R., 2012. Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics* 570–571, 1–41.

- <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.021>
- Jiang, Z., Li, Y., Wang, S., Zhang, X., 2020. Monitoring vegetation dynamics in karst regions using Google Earth Engine and Landsat time series. *Remote Sensing* 12, 1234. <https://doi.org/10.3390/rs12081234>
- Jin, S., Sader, S. A., 2005. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote sensing of Environment*, 94(3), 364-372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>
- Keputusan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 187.K/GL.01/MEM.G/2024 Tentang Penetapan Warisan Geologi (*Geoheritage*) Kabupaten Berau dan Kabupaten Kutai Timur Provinsi Kalimantan Timur.
- Liu, Y., Ziegler, A. D., Wu, J., Liang, S., Wang, D., Xu, R., Duangnamon, D., Li, H., Zeng, Z., 2022. Effectiveness of protected areas in preventing forest loss in a tropical mountain region. *Ecological Indicators*, 136, 108697. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108697>
- Mateo-García, G., Gómez-Chova, L., Amorós-López, J., Muñoz-Marí, J., Camps-Valls, G., 2018. Multitemporal cloud masking in the Google Earth Engine. *Remote sensing*, 10(7), 1079. <https://doi.org/10.3390/rs10071079>
- Peraturan Gubernur Kalimantan Timur No 67 Tahun 2012 Tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Karst Sangkulirang Mangkalihat di Kabupaten Berau dan Kabupaten Kutai Timur
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2012 Tentang Penetapan Kawasan Bentang Alam Karst.
- Pettorelli, N., 2013. *The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. Oxford University Press.
- Purnama, S. M., Wahyuningsih, N., Wirabumi, P., Karondia, L. A., 2025. Spatiotemporal Analysis of Forest Loss and Land Use Dynamics in The Sangkulirang–Mangkalihat Karst Ecosystem in East Kalimantan. *JURNAL GEOGRAFI Geografi dan Pengajarannya*, 23(2), 269-286. <https://doi.org/10.26740/jggp.v23n2.p269-286>
- Prasetya, K. D., Tsai, F. (2025). Multitemporal Spatial Analysis for Monitoring and Classification of Coal Mining and Reclamation Using Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 17(6), 1090. <https://doi.org/10.3390/rs17061090>
- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation (No. E75-10354).
- Santoso, H., Situmorang, R. M., 2023. Interpretasi Struktur Bawah Permukaan Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Schlumberger Untuk Identifikasi Anomali Rongga dan Gua di Kecamatan Sepaku, Kabupaten Penajam Paser Utara, Provinsi Kalimantan Timur. *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 21(2), 41-52. <https://doi.org/10.24198/bsc.v21i2.47210>
- Sukandar, A., Chazine, J.M., Setiawan, P., 2018. Pelestarian gua prasejarah di kawasan karst Sangkulirang–Mangkalihat, Kalimantan Timur. *Jurnal Arkeologi Indonesia* 37, 45–60.
- Sukardi, H., Sudana, D., Santosa, S., 2011. Peta Geologi Lembar Muaralasan Skala 1:250.000, Kalimantan. Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian ESDM.
- Tucker, C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150.
- White, W.B., 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, New York.
- Wilson, E. H., Sader, S. A., 2002. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385-396. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2)
- Yi, S., Huang, Y., Liu, Z., Long, F., Li, S., Sun, L., Luo, L., Su, H., 2025. Spatiotemporal evolution of karst rocky desertification and its driving factors on a large spatial scale utilizing google earth engine. *Environmental Earth Sciences*, 84(10), 275. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12282-5>
- Yuan, S. 2018. Hydroclimate changes in the Maritime Continent over the past 30,000 years recorded by speleothems from Sulawesi, Indonesia (Doctoral dissertation, Nanyang Technological University). <https://doi.org/10.32657/10220/47874>