

PERKIRAAAN EMISI GRK BERBASIS PERUBAHAN PENUTUPAN/PENGGUNAAN LAHAN PADA POLA RUANG PULAU RUPAT

Estimation of GHG Emissions based on Land Cover/Use Changes in the Spatial Pattern of Rupert Island

Fajar Kurniawan^{1*)}, Muhammad Ardiansyah²⁾, dan Syaiful Anwar³⁾

¹⁾ Program Studi Magister Ilmu Perencanaan Wilayah, Fakultas Pertanian IPB, Jl. Meranti Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

^{2,3)} Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian IPB, Jl. Meranti Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

ABSTRACT

Rupert Island, with 77.39% of its total land area of 152,371 ha consisting of peatlands, has experienced deforestation, forest degradation, and land conversion, making it both vulnerable to greenhouse gas (GHG) emissions and strategically important for land-based emission control. This study aims to estimate GHG emissions from the LULUCF sector through the identification of land cover/use changes in 2000, 2010, and 2020. Emission calculations were conducted using the stock difference approach of aboveground biomass as emission/sequestration factors for each land cover/use category. Emission projections for 2030 and 2040 were derived by comparing historical land cover/use changes with predicted land cover/use under the Business as Usual (BAU) scenario. These values were then compared with emissions estimated under the Spatial Planning (RTRW) scenario for 2022–2042. The results indicate a declining trend in emissions from land cover/use changes and peat decomposition, decreasing from 10.37 million tons of CO₂ in 2000–2010 to 7.99 million tons of CO₂ in 2010–2020. Total BAU emissions also show a reduction, estimated at 3.79 million tons of CO₂ for 2020–2030 and 3.45 million tons of CO₂ for 2030–2040. Meanwhile, total emissions under the RTRW scenario for 2022–2042 are projected to be 113% lower compared to BAU emissions for 2020–2040, which reached 3.95 million tons of CO₂.

Keywords: land cover/use prediction, LULUCF emissions, spatial planning.

ABSTRAK

Pulau Rupert, dengan 77.39% dari total wilayah daratan 152,371 ha merupakan lahan gambut, mengalami deforestasi, degradasi hutan, dan konversi lahan, sehingga menjadikannya daerah yang rentan terhadap pelepasan emisi gas rumah kaca (GRK) sekaligus strategis untuk pengendalian emisi berbasis lahan. Penelitian ini bertujuan memperkirakan emisi GRK sektor LULUCF melalui identifikasi perubahan penutupan/penggunaan lahan tahun 2000, 2010, dan 2020. Penghitungan emisi dilakukan dengan pendekatan *stock difference* cadangan biomassa atas permukaan sebagai faktor emisi/serapan setiap penutupan/penggunaan lahan. Proyeksi emisi tahun 2030 dan 2040 dihitung dengan membandingkan perubahan penutupan dan penggunaan lahan historis dengan prediksi penutupan dan penggunaan lahan (skenario *Business as Usual*/BAU). Nilai emisi tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai emisi sesuai Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) 2022–2042 (skenario RTRW). Hasil penelitian menunjukkan tren penurunan emisi dari perubahan penutupan/penggunaan lahan dan dekomposisi gambut, yaitu dari 10.37 juta ton CO₂ pada periode 2000–2010 menjadi 7.99 juta ton CO₂ pada periode 2010–2020. Total emisi BAU juga memperlihatkan penurunan, dengan perkiraan 3.79 juta ton CO₂ untuk periode 2020–2030 dan 3.45 juta ton CO₂ untuk periode 2030–2040. Sementara, total emisi berdasarkan skenario RTRW periode 2022–2042 diperkirakan 113% lebih rendah dibandingkan dengan skenario BAU periode 2020–2040 yang mencapai 3.95 juta ton CO₂.

Kata kunci: emisi LULUCF, prediksi tutupan/penggunaan lahan, perencanaan tata ruang

PENDAHULUAN

Indonesia berkomitmen untuk berkontribusi dalam menghadapi perubahan iklim dengan meratifikasi Persetujuan Paris melalui UU No. 16 Tahun 2016 tentang Pengesahan *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Kontribusi Indonesia dalam mewujudkan penurunan emisi disusun dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC). Indonesia mengambil langkah yang lebih ambisius dalam *Enhanced NDC* dengan meningkatkan target pengurangan emisi tanpa syarat/*unconditional* sebesar 31.89% dari sebelumnya 29% dalam *First NDC*, sedangkan pengurangan emisi bersyarat/*conditional* meningkat menjadi 43.2% dari sebelumnya 41% untuk tahun 2030 (PRI, 2022). Target pengurangan emisi dimanifestasikan

dalam 5 sektor emisi gas rumah kaca (GRK), yang mana target tanpa syarat untuk sektor LULUCF ditetapkan 17.4% atau 500 juta ton CO₂-eq, disusul sektor energi 12.5%, limbah 1.4%, pertanian 0.3% dan *industrial process and product use* (IPPU) 0.2%.

Perubahan penggunaan lahan merupakan salah satu faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi berbasis lahan (IPCC, 2006; Puspita dan Saputra, 2019). Berdasarkan laporan *Biennial Update Report* (BUR) 3, terjadi peningkatan emisi menjadi 1,845.07 juta ton CO₂-eq pada tahun 2019 dengan sektor *Land Use, Land Use Change, and Forestry* (LULUCF) termasuk kebakaran hutan dan lahan serta dekomposisi gambut sebagai kontributor terbesar emisi GRK yaitu sebesar 50.13% atau 924.85 juta ton CO₂-eq (PRI, 2021). Pulau Rupert sebagian besar wilayahnya termasuk Kesatuan Hidrologis Gambut

*) Penulis Korespondensi: Telp. +628117519191; Email. fajarkurniawanfajar@apps.ipb.ac.id DOI: <http://dx.doi.org/10.29244/jitl.27.2.123-130>

(KHG) yaitu 77.39% dari total luas daratannya. Periode 2015–2020, Pulau Rupat mengalami degradasi lahan akibat kebakaran hutan dan lahan seluas 11.5 ribu ha (7.50%) yang sebagian besar berada di lahan gambut (Fadilah, 2022). Selain itu, menurut *Global Forest Watch* (GFW, 2022) akibat deforestasi pada periode tahun 2001–2022 pulau Rupat melepaskan GRK sekitar 1.21 juta ton CO₂. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan, terutama akibat deforestasi, degradasi hutan, atau konversi lahan, berkontribusi terhadap peningkatan emisi GRK khususnya pada sektor berbasis lahan.

Kondisi tersebut menegaskan diatas urgensi perencanaan penggunaan lahan yang terintegrasi dengan prinsip keberlanjutan serta mempertimbangkan aspek mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) berfungsi sebagai instrumen strategis untuk mengarahkan pengelolaan lahan secara adaptif dan berorientasi jangka panjang. Namun, praktik penyusunan RTRW pada tingkat kabupaten/kota maupun provinsi masih cenderung menitikberatkan pada aspek fisik dan ekonomi, sementara isu perubahan iklim belum terakomodasi secara memadai. Integrasi potensi emisi GRK akibat alokasi pemanfaatan lahan serta risiko dampak iklim ke dalam dokumen RTRW dipandang dapat meningkatkan efektivitasnya sebagai instrumen kebijakan mitigasi dan adaptasi. Kebijakan tersebut berpotensi memperkuat ketahanan wilayah terhadap tekanan iklim di masa mendatang (Kumar dan Geneletti, 2015). Dalam RTRW Kabupaten Bengkalis (Perda No.1 Tahun 2022), Pulau Rupat ditetapkan sebagai kawasan yang mendukung pengembangan pertanian, keimigrasian, dan pemukiman guna menunjang pelayanan wilayah perbatasan. Pola ruang Pulau Rupat mencakup hutan produksi tetap, hutan produksi konversi, hutan produksi terbatas, kawasan perikanan budidaya, tanaman pangan, perkebunan, pemukiman, serta kawasan pariwisata. Penelitian ini bertujuan untuk memperkirakan emisi GRK historis akibat perubahan

penutupan/penggunaan lahan, termasuk dekomposisi gambut, serta membandingkannya dengan potensi emisi GRK yang diproyeksikan berdasarkan tren historis perubahan penutupan/penggunaan lahan dan alokasi penggunaan lahan dalam RTRW periode 2022–2042.

BAHAN DAN METODE

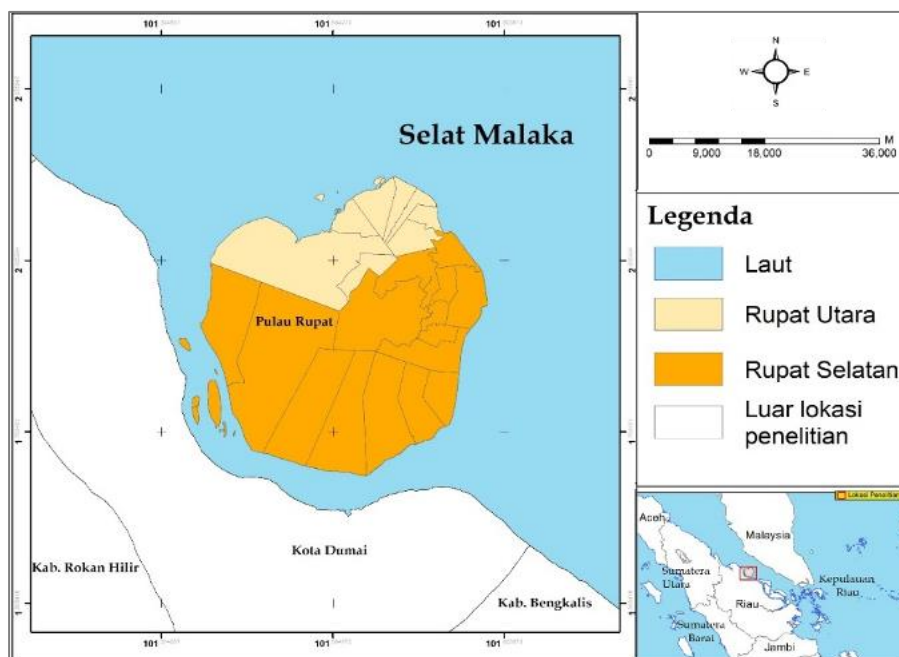
Tempat Penelitian

Lokasi penelitian di Pulau Rupat, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau yang terletak pada 1°40' s.d. 2°10' Lintang Utara dan 101°20'–101°50' Bujur Timur (Gambar 1). Secara administrasi, Pulau Rupat terdiri dari dua kecamatan yaitu Kecamatan Rupat dan Kecamatan Rupat Utara dengan total luas 1,523.7 km² (BPS, 2024).

Pengumpulan dan Analisis Data

Interpretasi dan Analisis Perubahan Penutupan/Penggunaan lahan

Peta penutupan/penggunaan lahan tahun 2000, 2010, serta 2020 bersumber dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) dimutakhirkan melalui interpretasi ulang citra Landsat pada tahun-tahun yang sama, yaitu 2000, 2010 dan 2020, dengan path/row 127/059. Proses interpretasi ulang dilakukan secara visual dengan mempertimbangkan karakteristik warna, rona, pola, tekstur, ukuran, bentuk, dan bayangan, serta mengacu pada batas kelas dari peta penutupan lahan KLHK dan hasil pemeriksaan lapang yang dilakukan pada bulan Juli 2023. Hasil interpretasi tersebut kemudian didigitasi menggunakan teknik on-screen digitizing. Selanjutnya, peta penutupan dan penggunaan lahan dianalisis melalui proses overlay (tumpang-susun) untuk memperoleh informasi perubahan penutupan/penggunaan lahan pada periode 2000–2010 dan 2010–2020.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Prediksi Perubahan Penutupan/Penggunaan Lahan

Peta penutupan/penggunaan lahan hasil interpretasi ulang digunakan sebagai data utama dalam memprediksi penutupan/penggunaan lahan tahun 2030 dan 2040. Prediksi dilakukan dengan memanfaatkan *plugin* MOLUSCE pada QGIS versi 2.18.28, dengan mempertimbangkan faktor pendorong berupa ketinggian, kelerengan, jarak dari jalan, jarak dari sungai, jarak dari permukiman, serta kepadatan penduduk (Iskandar *et al.*, 2024; Alshari dan Gawali, 2022). Pemodelan dilakukan melalui pendekatan *Cellular Automata Model* yang dikombinasikan dengan *MLP-Train Neural Network* untuk mempelajari pola spasial dan faktor pendorong perubahan penutupan/penggunaan lahan. Proses latihan menggunakan data historis tahun 2000 dan 2010, sedangkan data tahun 2020 digunakan untuk validasi, sehingga menghasilkan simulasi peta penutupan/penggunaan lahan pada tahun 2030 dan 2040.

Perkiraan Emisi CO₂ Perubahan Penutupan/Penggunaan Lahan dan RTRW

Perkiraan emisi dan serapan GRK dihitung dari perubahan biomassa yang diakibatkan oleh perubahan penutupan/penggunaan lahan dari 6 kategori penggunaan lahan utama IPCC, yang dapat dirumuskan dengan persamaan di bawah ini (IPCC, 2006):

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{FL} + \Delta C_{CL} + \Delta C_{GL} + \Delta C_{WL} + \Delta C_{SL} + \Delta C_{OL}$$

Di mana ΔC merupakan perubahan biomassa pada sektor AFOLU (pertanian, hutan, dan penggunaan lahan lain), FL adalah lahan hutan, CL adalah lahan pertanian, GL adalah padang rumput, WL adalah lahan basah, SL adalah pemukiman, dan OL adalah penggunaan lahan lain.

Perubahan biomassa dalam suatu periode dihitung menggunakan pendekatan *Stock-Difference*, yaitu metode yang menghitung selisih cadangan karbon biomassa akibat perubahan penutupan/penggunaan lahan pada dua titik waktu berbeda.

$$\Delta C = (C_{t2} - C_{t1}) / (t_2 - t_1)$$

Di mana ΔC merupakan perubahan cadangan karbon biomassa (ton C tahun⁻¹), C_{t1} adalah cadangan karbon biomassa penutupan/penggunaan lahan pada t_1 (ton C), C_{t2} adalah cadangan karbon biomassa penutupan/penggunaan lahan pada t_2 (ton C), t_1 adalah tahun awal dan t_2 adalah tahun akhir.

Cadangan karbon biomassa setiap kelas penutupan/penggunaan lahan dihitung dari perkalian luas penutupan/penggunaan lahan dikali dengan faktor emisi/serapan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$C_t = DA_t \times FE$$

Dalam persamaan di atas, C_t merepresentasikan cadangan karbon biomassa penutupan/penggunaan lahan pada tahun tertentu (ton C), DA_t menunjukan luas kelas penutupan/penggunaan lahan tahun tertentu (ha), sedangkan FE adalah faktor emisi/serapan yang dinyatakan dalam bentuk cadangan karbon dari suatu penutupan/penggunaan lahan (ton C ha⁻¹). Cadangan karbon yang digunakan pada penelitian adalah sebagai berikut:

Perubahan emisi dan serapan dalam karbon biomassa (ΔC) dikonversi menjadi emisi dalam CO₂-eq

(karbon dioksida ekuivalen) menggunakan persamaan di bawah ini:

$$Emisi CO_2 = \Delta C \times 0,5 \times 44/12$$

Tabel 1. Cadangan Karbon Penutupan/Penggunaan Lahan

Penutupan/Penggunaan Lahan	Biomassa atas Permukaan (ton /ha)
Hutan Rawa Primer	355,63
Hutan Rawa Sekunder	207,06
Hutan Mangrove Primer	236,17
Hutan Mangrove Sekunder	118,02
Hutan Tanaman	161,23
Perkebunan	48,10
Pertanian Lahan Kering	14,08
Semak Belukar Rawa	19,34
Pemukiman	2,17
Tanah Terbuka	2,40
Badan Air	0,00

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2022)

Perkiraan emisi dekomposisi lahan gambut pada setiap perubahan penggunaan lahan perlu diperhitungkan karena lokasi studi yaitu Pulau Rupat merupakan area yang didominasi lahan gambut dan dihitung dengan menggunakan rumus yang ditetapkan oleh IPCC (IPCC, 2006; IPCC, 2013):

$$Emisi dekomposisi gambut = DA \times (FE_B + FE_A)/2$$

Dimana DA adalah luas perubahan penutupan/penggunaan lahan, FE_B adalah faktor emisi dekomposisi gambut dari penutupan/penggunaan lahan awal (ton C ha⁻¹), dan FE_A adalah faktor emisi dekomposisi gambut dari penutupan/penggunaan lahan akhir (ton C ha⁻¹). Faktor emisi dekomposisi gambut menurut penutupan/penggunaan lahan disajikan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Faktor Emisi Dekomposisi Gambut menurut Penutupan/Penggunaan Lahan

Penggunaan Lahan	FE Dekomposisi Gambut (ton CO ₂ ha ⁻¹)
Belukar Rawa	0
Hutan Mangrove Primer	0
Hutan Mangrove Sekunder	19
Hutan Rawa Primer	0
Hutan Rawa Sekunder	19
Hutan Tanaman	73
Pemukiman	35
Perkebunan	40
Pertanian Lahan Kering	51
Tambak	0
Tanah Terbuka	51

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2022)

Dalam penelitian ini, analisis emisi LULUCF dilakukan melalui tiga skenario utama. Pertama, skenario emisi historis, yang merepresentasikan emisi akibat perubahan biomassa pada periode 2000–2010 dan 2010–2020. Kedua, skenario proyeksi emisi (*Business as Usual*/BAU), yang menggambarkan potensi emisi di masa mendatang sebagai konsekuensi perubahan biomassa pada periode 2020–2030, 2030–2040, serta akumulasi 2020–2040. Ketiga, skenario RTRW, yang memproyeksikan emisi masa depan berdasarkan implementasi alokasi penggunaan lahan sesuai dengan RTRW.

HASIL DAN PEMBAHASAN

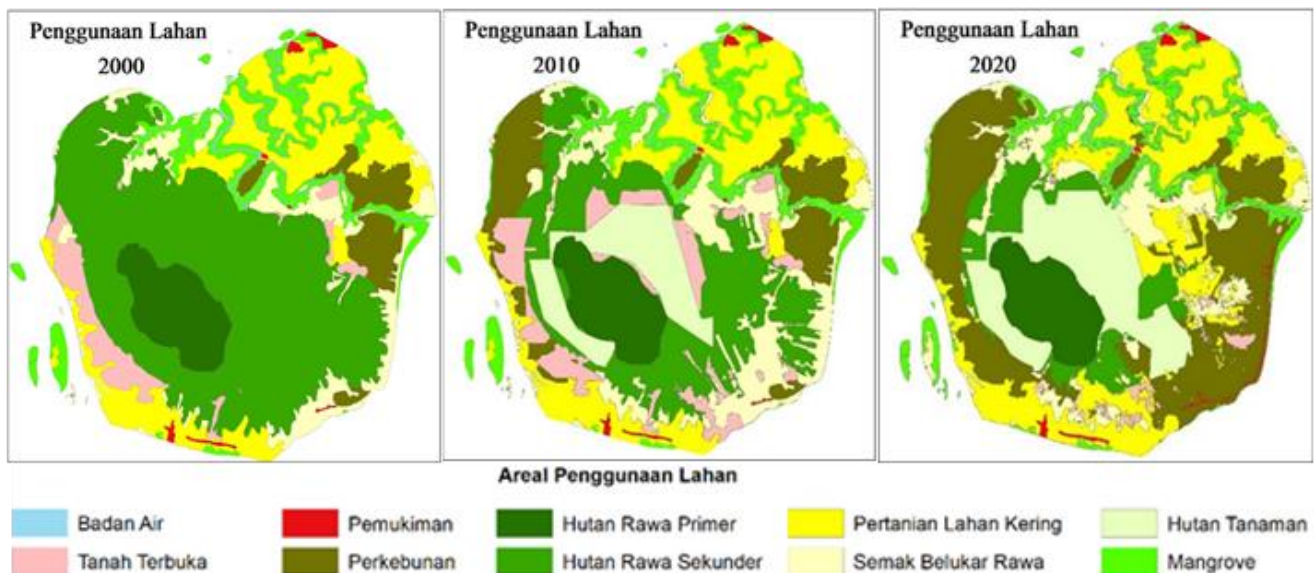
Perubahan Penutupan/Penggunaan Lahan

Interpretasi penutupan/penggunaan lahan di Pulau Rupat menghasilkan sepuluh kelas, yaitu badan air, hutan rawa primer, hutan rawa sekunder, hutan tanaman, mangrove, permukiman, perkebunan, pertanian lahan kering, semak belukar rawa, serta tanah terbuka. Persebaran penutupan/penggunaan lahan pada tahun 2000, 2010, dan 2020 ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan luas perubahan antar kelas disajikan pada Tabel 3. Pada periode 2000–2010, perubahan luasan terbesar terjadi pada hutan rawa sekunder dengan total 67.491 ha, diikuti oleh pertanian lahan kering (26,089 ha) dan mangrove (16,100 ha). Tahun 2010 menunjukkan bahwa hutan rawa sekunder masih mendominasi penutupan lahan dengan luas 32.985 ha, disusul oleh pertanian lahan kering (26,014 ha) dan semak belukar rawa (22,222 ha). Sebaliknya, kondisi tahun 2020 memperlihatkan pergeseran yang signifikan, di mana perkebunan menjadi penggunaan lahan terbesar dengan luas 39,166 ha, diikuti oleh pertanian lahan kering (35,065 ha) dan hutan tanaman (20,852 ha).

Dinamika penutupan dan penggunaan lahan di Pulau Rupat ditunjukkan oleh adanya empat kelas yang mengalami tren perubahan signifikan, yaitu hutan rawa sekunder, hutan tanaman, perkebunan, serta pertanian lahan kering. Hutan rawa sekunder mengalami penurunan luas

yang cukup besar pada periode 2000–2010 dan 2010–2020 masing-masing 51.33% dan 64.68%. Sebaliknya, kelas non-hutan seperti hutan tanaman, perkebunan, pertanian lahan kering, dan semak belukar rawa memperlihatkan peningkatan luas yang konsisten (Tabel 3). Kondisi tersebut mengindikasikan terjadinya konversi lahan dari penutupan hutan menjadi penggunaan non-hutan, dengan dominasi konversi menjadi perkebunan dan hutan tanaman. Penelitian lain di Indonesia mendukung temuan ini, Juniyanti *et al.* (2021) menunjukkan bahwa konversi hutan menjadi perkebunan di Sumatra dan Kalimantan didorong oleh kombinasi kebijakan pembangunan, investasi swasta, serta kebutuhan pasar global. Selain itu, penelitian Widyati *et al.* (2022) menegaskan bahwa konversi hutan alam menjadi hutan tanaman atau perkebunan berimplikasi pada degradasi tanah dan penurunan fungsi ekosistem.

Deforestasi serta pengembangan kawasan perkebunan dan pertanian pada periode 2000–2010 dan 2010–2020 diperkirakan berkontribusi terhadap peningkatan emisi GRK. Sejumlah kajian menegaskan bahwa emisi yang bersumber dari deforestasi dan aktivitas pertanian telah diidentifikasi sebagai salah satu permasalahan utama di negara-negara berkembang dengan basis wilayah pedesaan, di mana sektor-sektor berbasis lahan menjadi penopang utama pertumbuhan ekonomi (Pendrill *et al.*, 2019; Houghton *et al.*, 2017; Mujiono *et al.*, 2016).



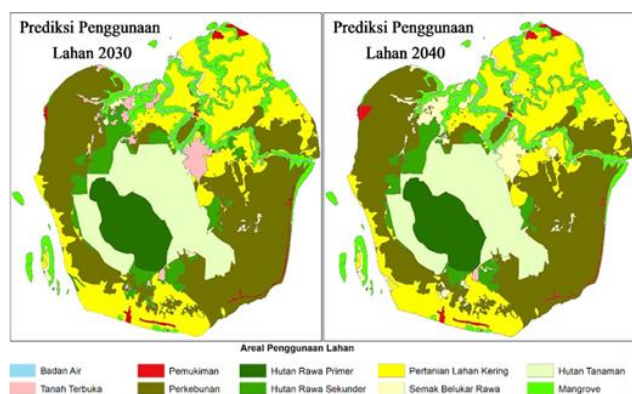
Gambar 1. Penutupan/Penggunaan lahan Pulau Rupat tahun 2000, 2010, 2020

Tabel 3. Perubahan Penutupan/Penggunaan Lahan Pulau Rupat tahun 2000, 2010, 2020

Penutupan/ Penggunaan Lahan	Luas (ha)			Perubahan (ha)		Perubahan (%)	
	2000	2010	2020	2000–2010	2010–2020	2000–2010	2010–2020
Badan Air	1,678	1,678	1,678	0	0	0	0
Hutan Rawa Primer	10,554	10,554	10,554	0	0	0	0
Hutan Rawa Sekunder	67,491	32,985	11,649	-34,506	-21,336	-51.33	-64.68
Hutan Tanaman	0	13,269	20,852	13,269	7,582	132.69	57.14
Mangrove	16,100	15,798	14,802	-302	-996	-1.88	-6.30
Pemukiman	846	846	1,189	0	343	0	40.51
Perkebunan	8,580	16,210	39,166	7,630	22,955	88.93	141.61
Pertanian Lahan Kering	26,089	26,014	35,054	-75	9,040	-0.29	34.75
Semak Belukar Rawa	13,609	22,222	15,239	8,614	-6,983	63.30	-31.42
Tanah Terbuka	7,425	12,795	2,189	5,370	-10,606	72.33	-82.89
Total	152,371	152,371	152,371				

Prediksi Penutupan/Penggunaan Lahan

Prediksi perubahan penutupan/penggunaan lahan menunjukkan bahwa pada tahun 2030 dan 2040 kategori yang mendominasi adalah perkebunan, pertanian lahan kering, serta hutan tanaman. Luas perkebunan dan hutan tanaman diproyeksikan mengalami peningkatan, dengan nilai masing-masing sebesar 53,950 ha dan 22,244 ha pada tahun 2030, serta meningkat menjadi 54,479 ha dan 22,577 ha pada tahun 2040. Sebaliknya, pertanian lahan kering diperkirakan mengalami penurunan sebesar 3.37% atau berkurang 1,180 ha, dari total luas 35,054 ha pada tahun 2020 menjadi 33,874 ha pada tahun 2030. Jenis penutupan/penggunaan lahan lain, seperti hutan rawa sekunder, mangrove, dan semak belukar rawa, diprediksi terus mengalami penurunan hingga tahun 2040 (Gambar 3). Ringkasan perubahan luas penutupan/penggunaan lahan di Pulau Rupat tahun 2020 serta proyeksi tahun 2030 dan 2040 disajikan pada Tabel 4.



Gambar 3. Prediksi Penutupan/Penggunaan Lahan Tahun 2030 dan 2040

Tabel 4. Luas Penutupan/Penggunaan Lahan Tahun 2030 dan 2040

Penggunaan Lahan	Luas (ha)	
	2030	2040
Badan Air	1,678	1,678
Hutan Rawa Primer	10,546	10,545
Hutan Rawa Sekunder	7,328	6,759
Hutan Tanaman	22,244	22,577
Mangrove	14,065	14,060
Pemukiman	1,277	1,545
Perkebunan	53,950	54,479
Pertanian Lahan Kering	33,874	33,808
Semak Belukar Rawa	3,969	6,651
Tanah Terbuka	3,441	269
Total	152,371	152,371

Berdasarkan hasil prediksi penutupan/penggunaan lahan tahun 2030 dan 2040 perubahan penggunaan lahan akan terus terjadi terutama pada pemanfaatan lahan berhutan untuk perkebunan, hutan tanaman, dan pertanian lahan kering. Hal ini memperlihatkan bahwa Pulau Rupat di masa depan masih mengalami deforestasi dan degradasi hutan karena pemanfaatan sumberdaya lahan untuk pembangunan seperti yang terjadi dalam 2 dekade terakhir, yang mana menurut Jikalahari (2009); Puspita *et al.* (2021); Syaufina dan Hafni (2018) aktivitas manusia dalam memanfaatkan sumber daya lahan pada Pulau Rupat menyebabkan konversi penutupan/penggunaan lahan melalui deforestasi dan degradasi hutan. Ekspansi

perkebunan, hutan tanaman, dan pertanian lahan kering melalui proses deforestasi atau alih fungsi lahan dari kawasan berhutan menjadi lahan non-hutan diperkirakan akan memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan emisi GRK di sektor berbasis lahan pada masa mendatang. Besar kecilnya emisi yang dihasilkan sangat ditentukan oleh besaran perubahan penutupan dan penggunaan lahan yang terjadi serta luas hutan yang masih tersisa sebagai penyerap dan penyimpan karbon.

Perkiraan Emisi GRK Pulau Rupat

Emisi Historis dan Proyeksi Emisi

Hasil penghitungan emisi GRK dari perubahan penutupan/penggunaan lahan periode historis tahun 2000–2010 dan 2010–2020, serta proyeksi emisi BAU untuk periode 2020–2030 dan 2030–2040 disajikan pada Tabel 5. Nilai negatif menunjukkan serapan pada tahun akhir dibandingkan terhadap tahun awal, dengan lain perkataan terjadi sekuestrasi, yaitu penyerapan CO₂ melalui proses fotosintesis. Sebaliknya, nilai positif menunjukkan emisi akibat berkurangnya cadangan karbon biomassa sebagai konsekuensi dari perubahan penutupan/penggunaan lahan. Total nilai emisi yang ditampilkan merupakan emisi bersih (net emission), yaitu jumlah emisi CO₂ setelah dikurangi dengan CO₂ yang berhasil diserap.

Berdasarkan hasil perkiraan emisi LULUCF yang dihasilkan dari setiap perubahan penutupan/penggunaan lahan, terlihat adanya tren penurunan emisi CO₂ secara agregat pada setiap dekade antara tahun 2000 hingga 2040 (Tabel 5). Tingkat emisi tertinggi terjadi pada periode historis 2000–2010 dengan total sebesar 10.37 juta ton CO₂, yang terdiri atas emisi perubahan biomassa sebesar 8,31 juta ton CO₂ dan emisi dari dekomposisi gambut sebesar 2,06 juta ton CO₂. Selanjutnya, total emisi menunjukkan penurunan pada periode historis 2010–2020 serta pada proyeksi emisi BAU untuk periode 2020–2030 dan 2030–2040. Nilai emisi masing-masing adalah sebesar 7,99 juta ton CO₂ (perubahan biomassa 5.28 juta ton CO₂ dan dekomposisi gambut 2.71 juta ton CO₂), 3.79 juta ton CO₂ (perubahan biomassa 0.67 juta ton CO₂ dan dekomposisi gambut 3.12 juta ton CO₂), serta 3.45 juta ton CO₂ (perubahan biomassa 0.12 juta ton CO₂ dan dekomposisi gambut 3.33 juta ton CO₂).

Penurunan total emisi terutama disebabkan oleh berkurangnya luas hutan rawa sekunder yang memiliki cadangan karbon biomassa tinggi sejak tahun 2010, sehingga potensi konversi lahan dengan simpanan karbon besar semakin berkurang mengikuti tren historis (lihat Tabel 3). Oleh karena itu, tren penurunan emisi masa depan pada periode 2020–2040 lebih mencerminkan berkurangnya stok karbon yang tersisa untuk dikonversi daripada keberhasilan mitigasi, sehingga pengelolaan lahan berkelanjutan tetap menjadi agenda penting dalam menekan emisi GRK di masa depan. Sebaliknya, emisi dekomposisi gambut diproyeksikan terus meningkat dan menjadi kontributor utama emisi. Hal ini menunjukkan bahwa proses degradasi lahan gambut akibat konversi lahan masih berlangsung, disertai dengan pengeringan yang terus terjadi, sehingga luas lahan gambut yang terdegradasi semakin meningkat. Kondisi tersebut menegaskan perlunya upaya penanganan yang lebih intensif dan terarah untuk mengendalikan dampak negatif terhadap ekosistem gambut.

Tabel 5. Perkiraan Emisi Historis dan BAU sektor LULUCF

Kategori Penggunaan Lahan	Emisi (juta ton CO ₂)			
	Historis		Proyeksi (BAU)	
	2000–2010	2010–2020	2020–2030	2030–2040
FL	1.11	-0.98	0.14	0.10
FL–FL	1.11	0.35	0.14	0.14
L–FL	0.00	-1.33	0.00	-0.04
CL	1.44	3.53	0.32	0.08
CL–CL	0.00	-0.05	-0.30	-0.02
L–CL	1.44	3.58	0.62	0.10
GL	3.31	2.31	0.00	-0.09
GL–GL	-	-	-	-
L–GL	3.31	2.31	0.00	-0.09
SL	0.00	0.02	0.02	0.02
SL–SL	-	-	-	-
L–SL	0.00	0.02	0.02	0.02
OL	2.44	0.40	0.19	0.01
OL–OL	0.00	0.00	0.00	0.00
L–OL	2.44	0.40	0.19	0.01
Dekomposisi Gambut	2.06	2.71	3.12	3.33
Total	10.37	7.99	3.79	3.45

Keterangan: FL– FL (penggunaan lahan tersisa pada *forestland*), L–FL (penggunaan lahan menjadi *forestland*), CL–CL (penggunaan lahan tersisa pada *cropland*), L–CL (penggunaan lahan menjadi *cropland*), GL–GL (penggunaan lahan tersisa pada *grassland*), L–GL (penggunaan lahan menjadi *grassland*), SL–SL (penggunaan lahan tersisa pada *settlement*), L–SL (penggunaan lahan menjadi *settlement*), OL – OL (penggunaan lahan tersisa pada *otherland*), L OL (penggunaan lahan menjadi *otherland*).

Studi di Kalimantan Tengah memberikan gambaran serupa, di mana hutan sekunder dengan kepadatan tinggi mengalami penurunan signifikan. Pada tahun 2010 hanya tersisa sekitar 80% dari tingkat tahun 1996, dan sebagian besar dikonversi menjadi lahan pertanian serta pemukiman. Selain itu, sejak tahun 2008 terjadi peningkatan luas perkebunan kelapa sawit. Perubahan penggunaan lahan tersebut menghasilkan emisi GRK tahunan rata-rata sebesar 5,450 kiloton CO₂eq hingga tahun 2010 (Takahashi *et al.*, 2014). Temuan ini memperkuat bukti bahwa konversi hutan sekunder ke lahan non-hutan menjadi salah satu pendorong utama emisi LULUCF, baik di Pulau Rupat maupun di wilayah lain di Indonesia.

Emisi Skenario BAU 2020–2040 dan Skenario RTRW 2020–2040

Pada periode 2020–2040, total emisi LULUCF diperkirakan mencapai 3.95 juta ton CO₂, sedangkan implementasi RTRW menunjukkan potensi penyerapan hingga 0,51 juta ton CO₂ (Tabel 6). Perbedaan ini menunjukkan bahwa penerapan tata ruang secara konsisten berpotensi memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi. Kontributor utama emisi dalam periode tersebut berasal dari proses dekomposisi gambut, yang diproyeksikan menyumbang 3.19 juta ton CO₂ dan meningkat menjadi 3.95 juta ton CO₂ dalam skenario RTRW. Sementara, emisi akibat perubahan biomassa dalam skenario BAU sebesar 0.76 juta ton CO₂, sedangkan dalam skenario RTRW mencapai -4.47 juta ton CO₂, yang menunjukkan adanya potensi serapan. Besarnya emisi dekomposisi gambut pada implementasi RTRW terutama disebabkan oleh hilangnya hutan rawa primer di lahan gambut akibat konversi menjadi hutan tanaman pada kawasan hutan produksi. Oleh karena itu, mempertahankan keberadaan hutan primer serta melaksanakan perlindungan dan restorasi gambut menjadi langkah strategis dalam menekan laju emisi di Pulau Rupat.

Tabel 6. Emisi Skenario BAU 2020–2040 dan RTRW 2022–2042

Kategori	Emisi (Juta ton CO ₂)	
	BAU 2020–2040	RTRW 2022–2042
FL	0.12	-5.01
FL–FL	0.16	4.22
L–FL	-0.04	-9.24
CL	0.40	-0.13
CL–CL	-0.31	-0.52
L–CL	0.71	0.39
GL	0.00	0.00
GL–GL	0.00	0.00
L–GL	0.00	0.00
SL	0.04	0.62
SL–SL	0.00	0.00
L–SL	0.04	0.62
OL	0.20	0.06
OL–OL	0.00	0.00
L–OL	0.20	0.06
Dekomposisi Gambut	3.19	3.95
Total	3.95	-0.51

Keterangan: FL– FL (penggunaan lahan tersisa pada *forestland*), L–FL (penggunaan lahan menjadi *forestland*), CL–CL (penggunaan lahan tersisa pada *cropland*), L–CL (penggunaan lahan menjadi *cropland*), GL–GL (penggunaan lahan tersisa pada *grassland*), L–GL (penggunaan lahan menjadi *grassland*), SL–SL (penggunaan lahan tersisa pada *settlement*), L–SL (penggunaan lahan menjadi *settlement*), OL – OL (penggunaan lahan tersisa pada *otherland*), L OL (penggunaan lahan menjadi *otherland*).

Berdasarkan Tabel 6, total emisi GRK dalam skenario RTRW lebih rendah 4.46 juta ton CO₂ atau 113% dibandingkan dengan emisi pada skenario BAU. Ini menunjukkan bahwa pola ruang dalam RTRW Kabupaten Bengkalis mampu menekan emisi GRK berbasis lahan di Pulau Rupat. Penurunan emisi tersebut masih dapat ditingkatkan apabila degradasi hutan pada sub-kategori FL–FL dapat ditekan hingga lebih rendah dari 4.22 juta ton CO₂ melalui pengawasan tata ruang. Perencanaan tata ruang merupakan sebuah perangkat kebijakan untuk mengendalikan emisi GRK (Chen *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2025), sekaligus menjadi bagian dari upaya mitigasi dan

adaptasi dalam pengembangan wilayah rendah karbon (Zen *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

SIMPULAN

Dinamika perubahan penggunaan lahan dari tahun 2000–2020, mengindikasikan telah terjadinya deforestasi dan degradasi hutan disertai dengan peningkatan luas perkebunan, hutan tanaman dan pertanian lahan kering. Hutan Rawa Sekunder mengalami penurunan luas signifikan pada setiap dekade, yaitu sebesar 67,491 ha pada tahun 2000, 32,985 ha tahun 2010, dan 11,649 ha tahun 2020. Sebaliknya luas perkebunan mengalami peningkatan bertahap, masing-masing sebesar 8,580 ha, 16,210 ha, dan 39,166 ha per dekade. Berdasarkan proyeksi, luas perkebunan, hutan tanaman, dan pertanian lahan kering diperkirakan akan terus meningkat melalui konversi hutan pada tahun 2030 dan 2040.

Proyeksi emisi GRK LULUCF yang dihasilkan oleh skenario BAU 2020–2040 lebih tinggi dibandingkan emisi yang dihasilkan dari implementasi perencanaan pola ruang pada skenario RTRW 2022–2042. Emisi skenario BAU diperkirakan mencapai 3.95 juta ton CO₂, sedangkan emisi skenario RTRW lebih rendah sebesar 113% atau 4.46 juta ton CO₂ dibandingkan emisi BAU.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Departemen Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University, khususnya Divisi Penginderaan Jauh dan Informasi Spasial yang telah memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alshari, E.A. and B.W. Gawali. 2022. Modeling Land Use Change in Sana'a City of Yemen with MOLUSCE. *Journal of Sensors Hindawi Limited*, 2022(1): 1–15. doi: 10.1155/2022/7419031
- [BPS] Badan Pusat Statistik Kabupaten Bengkalis. 2024. *Kabupaten Bengkalis dalam Angka 2024*. BPS Kabupaten Bengkalis. Bengkalis.
- Chen, F., Y. Li. And X. Ma. 2023. Is the city low-carbon because of its compactness? An empirical study in Shanghai, China. *Urban Clim*, 52: 101690.
- Fadilah, K.H. 2022. Dinamika dan Estimasi Luas Area Terbakar Akibat Kebakaran Hutan dan Lahan di Kabupaten Bengkalis [Tesis]. IPB Univ. Bogor.
- [GFW] Global Forest Watch. 2022. *Tree cover loss in Bengkalis, Riau, Indonesia*. [diakses 5 Desember 2022 pukul 00.45 WIB]. <https://gfw.global/3xDz02X>.
- Houghton, R.A. and A.A. Nassikas. 2017. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. *Global Biogeochem. Cycles*, 31(3): 456–472. doi.org/10.1002/2016GB005546.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Methodological Guidance on Lands with Wet and Drained Soils, and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*.
- [Jikalahari] Jaringan Kerja Penyelamat Hutan Riau. 2009. *Fakta Kritis: Analisis Tata Kelola Kehutanan di Provinsi Riau*. Jikalahari. Pekanbaru.
- Juniyanti, L., H. Purnomo, H. Kartodihardjo and L.B. Prasetyo. 2021. Understanding the driving forces and actors of land change due to forestry and agricultural practices in Sumatra and Kalimantan: A systematic review. *Land*, 10(5): 463. doi.org/10.3390/land10050463.
- Iskandar, B., Saidah, A.A. Kurnia, A. Jauhari and F. Zannah. 2024. Modelling land cover change using MOLUSCE in Kahayan Tengah forest management unit, Kalimantan Tengah. *Jurnal Sylva Lestari*, 12(2): 242–257. doi.org/10.23960/jsl.v12i2.865.
- [KLHK] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2022. *National Forest Reference Level for Deforestation, Forest Degradation and Enhancement of Forest Carbon Stock, Submission by Indonesia*.
- Kumar, P. and D. Geneletti. 2015. How are climate change concerns addressed by spatial plans? An evaluation framework, and an application to Indian cities. *Land use policy*, 42:210–226. doi:10.1016/j.landusepol.2014.07.016.
- Mujiono, M., T.L. Indra and D. Harmantyo. 2017. Spatial Analysis of Deforestation and Its Impact on Carbon Emissions Using FREL. *1st Int. Conf. Geogr. Educ.*, 79: 289–294. doi:10.2991/icge-16.2017.55.
- Pendrill, F., U.M. Persson, J. Godar, T. Kastner, D.Moran, S. Shimdt and R. Wood. 2019. Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. *Global Environmental Change*, 56:1–10. doi:10.1016/j.gloenvcha.2019.03.002.
- [PERDA] Peraturan Daerah Kabupaten Bengkalis No. 1 Tahun 2022 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Bengkalis Tahun 2022–2042.
- [PRI] 2016. *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 16 Tahun 2016 tentang Pengesahan Paris Agreement to The United Nations on Framework Convention on Climate Change (Persetujuan Paris Atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa Mengenai Perubahan Iklim)*. Sekretariat Negara. Jakarta.
- [PRI] 2021. *Indonesia Third Biennial Update Report*. Sekretariat Negara. Jakarta.

- [PRI] 2022. *Enhanced Nationally Determined Contribution Republic of Indonesia*. Sekretariat Negara. Jakarta.
- Puspita, I.B. and F.A. Saputra. 2019. Effect of Land Use Change to the Increasing Land-Based Emission and Urban Heat Island Phenomenon in Bandung City. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 328(1). doi:10.1088/1755-1315/328/1/012021
- Puspita, D., Mubarak and Nursyiwani. 2021. Analysis of coastline changes in rupa island using remote sensing data and geographic information systems. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 4(3): 236-246.
- Syaufina, L. dan D.A.F. Hafni. 2018. Variabilitas iklim dan kejadian kebakaran hutan dan lahan gambut di Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 9(1): 60-68.
- Yang, H., G. Zhai, Y. Ge, T. Jiang and B. Su. 2025. Spatial-temporal difference of urban carbon budget and carbon compensation optimization partition from the perspective of spatial planning. *Land*, 14 (41): 1-9. doi: 10.3390/land14020414.
- Takahashi, F., T. Matsumoto and D. Murdiyarso. 2014. Estimation of potential GHG emission reduction through corresponded REDD Plus activities in remote area in Central Kalimantan, Indonesia - Case study in the Paduran area. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(6): 787-804
- Widyati, E., H.S. Nuroniah, H.L. Tata, N. Mindawati, Y. Lisnawati, Darwo, L. Abdulah, N.E. Lelana, Mawazin and D. Octavia. 2022. Soil Degradation Due to Conversion from Natural to Plantation Forests in Indonesia. *Forests* 2022, 13: 1913. doi.org/10.3390/f13111913.
- Zen, I.S., A. Al-Amin and B. Doberstein. 2019. Mainstreaming climate adaptation and mitigation policy: towards multi-level climate governance in Melaka, Malaysia. *Urban Clim.*, 30: 100501.
- Zhang, H., J. Peng, R. Wang, J. Zhang and D. Yu. 2021. Spatial planning factors that influence CO₂ emissions: A systematic literature review. *Urban Climate*, 36: 100809. doi.org/10.1016/J.UCLIM.2021.100809.