

ANALISIS PENGARUH LUAS HUTAN TERHADAP KONSENTRASI GAS KARBON DIOKSIDA

Studi Kasus di Rondônia, Hutan Hujan Amazon, Brazil Tahun 2016 dan 2021

*(Analysis of the Effect of Forest Area toward Carbon Dioxide Gas Concentration
Study Case in Rondônia, Amazon Rainforest, Brazil Year 2016 and 2021)*

Dhina Rahardian, Yudo Prasetyo, Nurhadi Bashit

Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, S.H., Tembalang, Semarang, Indonesia
E-mail: rahardian1912@gmail.com

Diterima: 5 Februari 2024; Direvisi 12 Maret 2024; Disetujui untuk Dipublikasikan 29 April 2024

ABSTRAK

Perubahan iklim yang disebabkan oleh pemanasan global yang berakar dari efek rumah kaca merupakan bencana yang harus dikurangi dan dimitigasi demi kelangsungan hidup manusia di bumi. Salah satu gas rumah kaca yang paling banyak di udara saat ini adalah karbon dioksida. Deforestasi merupakan salah satu sebab bertambahnya gas karbon dioksida. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis luas hutan dan konsentrasi gas karbon dioksida (XCO_2) serta hubungan antar keduanya di Rondônia, Brazil tahun 2016 dan 2021. Metode untuk mendapatkan luas hutan adalah dengan klasifikasi *Wishart* pada citra Sentinel-1 dan untuk XCO_2 menggunakan data hasil akuisisi satelit OCO-2 serta uji statistik menggunakan uji regresi linier dan korelasi sederhana. Hasil klasifikasi *Wishart* diuji akurasi menggunakan data titik validasi dari MapBiomas sedangkan citra OCO-2 telah dikalibrasi dan divalidasi oleh penyedia citra (NASA). Hasilnya didapatkan bahwa kelas vegetasi berkurang seluas 282.556,218 ha (1,445%) dan XCO_2 meningkat sebesar 11,343 ppm (2,819%). Namun, dari hasil uji statistik tidak didapatkan pengaruh yang signifikan dan korelasi negatif antar keduanya. Walaupun terjadi pengurangan luas hutan dan kenaikan XCO_2 keduanya tidak saling berkaitan. Hal tersebut dapat terjadi karena kelimpahan XCO_2 di udara sudah terlalu banyak sehingga walaupun hutan masih luas siklus karbon dioksida sudah tidak terpengaruh oleh jumlah pohon.

Kata kunci: Klasifikasi *Wishart*, OCO-2, Sentinel-1, XCO_2

ABSTRACT

*Climate change caused by global warming which is rooted from the greenhouse effect is a disaster that must be reduced and mitigated for human life existent on earth. One of the most abundant greenhouse gases in the air today is carbon dioxide. Deforestation is one of the causes of increasing carbon dioxide gas. The aim of this research is to analyze forest area and carbon dioxide gas concentration (XCO_2) and the relationship between the two in Rondônia, Brazil in 2016 and 2021. The method for obtaining forest area is the *Wishart* classification on Sentinel-1 imagery and for XCO_2 is using the resulting data OCO-2 satellite acquisition also statistical tests using linear regression and simple correlation tests. The *Wishart* classification results were accuracy tested using validation point data from MapBiomas while the OCO-2 image has been calibrated and validated by the image provider (NASA). The results showed that the vegetation zone was reduced by 282,556.218 (1.445%) ha and XCO_2 increased by 11.343 (2.819%) ppm. However, the results of statistical tests did not show a significant effect and a negative correlation between the two. Even though there is a reduction in forest area and an increase in XCO_2 , the two are not related to each other. This can happen because the abundance of XCO_2 in the air is too much so that even though the forest is still large, the carbon dioxide cycle is not affected by the number of trees.*

Keywords: OCO-2, Sentinel-1, *Wishart* classification, XCO_2

PENDAHULUAN

Perubahan iklim sebenarnya merupakan siklus berulang di permukaan bumi yang dipengaruhi oleh sudut kemiringan bumi terhadap sumbu axis-nya, bentuk orbit bumi terhadap matahari termasuk intensitas cahaya matahari yang diterima oleh bumi, dan lain-lain (Chandler, 2023). Namun, istilah perubahan iklim tersebut sekarang telah bergeser sebagai peristiwa luar biasa yang disebabkan oleh pemanasan global. Sejak tahun 1880 tepatnya

ditandai dengan dimulainya revolusi industri, suhu global terus naik (Chandler, 2023). Pemanasan global disebabkan oleh adanya efek rumah kaca.

Gas rumah kaca memerangkap cahaya matahari yang masuk ke atmosfer sehingga menyebabkan suhu naik (Chandler, 2023). Gas rumah kaca di antaranya adalah uap air, karbon dioksida, metana, nitrogen oksida, dan sebagainya. Gas-gas tersebut dapat bersumber dari kebakaran hutan, pemakaian minyak bumi, pembakaran bahan bakar fosil, perkebunan, dan lain-lain. Perubahan

iklim yang dimulai dari emisi gas rumah kaca yang berlebih dapat menimbulkan dampak buruk seperti cuaca ekstrim (hujan badai), udara panas (*heat*) dan kering (*humidity*), naiknya permukaan laut, dan lain-lain. Gas rumah kaca telah meningkat sebesar 49% dan 66%-nya dipengaruhi oleh gas karbon dioksida (Lindsey, 2023).

Deforestasi menjadi salah satu penyebab bertambah banyaknya gas karbon dioksida, karena tanaman hijau yang berperan dalam siklus karbon berkurang. Terdapat korelasi negatif yang kuat antara gas karbon dioksida dengan hutan campuran dan hutan tanaman berdaun lebar (Chhabra & Gohel, 2019). Penelitian di *state* Mato Grosso, Brazil menunjukkan bahwa hutan yang diubah menjadi penggunaan lahan lain menghasilkan CO₂ lebih banyak daripada hutan yang dibiarkan tetap lestari (Rossi et al., 2022). Penelitian lain yang dilakukan di daerah *Eastern Amazonia* menunjukkan bahwa pada tahun 2015-2018 terjadi peningkatan XCO₂ dari 362,2 ppm menjadi 403,4 ppm (Santos et al., 2022).

Penginderaan jauh menjadi sarana penelitian yang tepat untuk meneliti wilayah yang luas bahkan di tempat yang jauh sekalipun. Citra-citra hasil penginderaan jauh telah banyak dimanfaatkan seperti citra Landsat dan Sentinel untuk pengamatan penggunaan dan tutupan lahan (*Land Use Land Cover*), deformasi, dan lain-lain. Algoritma yang sering digunakan di antaranya NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) untuk analisis kerapatan vegetasi, NDWI (*Normalized Difference Water Index*) untuk analisis badan air, NDBI (*Normalized Difference Build-up Index*) untuk analisis lahan terbangun (Kshetri, 2018), serta InSAR dan DInSAR untuk analisis deformasi. Sedangkan satelit pengamatan yang mengamati udara di atmosfer seperti satelit OCO ada GOSAT milik negara Jepang dan TanSat milik negara Tiongkok.

Pengamatan tutupan lahan dengan menggunakan citra Sentinel-1 dengan metode dekomposisi polarimetrik klasifikasi *Wishart* dipilih karena citra Sentinel-1 merupakan citra SAR yaitu citra bebas awan. Hal tersebut menjadi penting karena kawasan hutan hujan merupakan daerah dengan presipitasi tinggi sehingga kenampakan awan banyak. Selain awan, citra SAR juga dapat menembus kabut yang ada di hutan hujan. Sedangkan, klasifikasi *Wishart* merupakan klasifikasi yang menghasilkan 9 kelas tutupan lahan di mana 6 di antaranya merupakan kelas vegetasi. Oleh karena itu, klasifikasi *Wishart* menguntungkan untuk digunakan pada pengamatan vegetasi atau hutan.

Dekomposisi polarimetrik H- α memanfaatkan mekanisme hamburan berdasarkan *eigen value* terhadap matriks koherensi dan kovarian menjadi *entropy* (keacakan hamburan), *isotropy* (jumlah mekanisme hamburan dominan), dan *alpha angle* (jenis hamburan rata-rata atau yang paling dominan menurut sudut pantulnya) (Varghese & Joshi, 2015). Klasifikasi *Wishart* merupakan klasifikasi

yang menggunakan hasil dekomposisi polarimetrik H- α dan menghasilkan 9 kelas tutupan lahan (Yonezawa et al., 2012).

Penerapan dekomposisi polarimetrik H- α dan klasifikasi *Wishart* sudah banyak dimanfaatkan untuk analisis hutan contohnya di Kabupaten Subang, Jawa Barat (Putra et al., 2015), di Provinsi Riau (Shafitri et al., 2018), di Provinsi Sumatra Selatan (Anisa & Rokhmana, 2019), dan di Taman Nasional Way Kambas (Aryasatya et al., 2022).

XCO₂ merupakan *column-averaged CO₂ dry air mole fraction* (fraksi mol udara kering CO₂ rata-rata kolom) adalah perbandingan antara kelimpahan CO₂ terhadap kelimpahan kolom udara kering (Crisp et al., 2021). XCO₂ merupakan pengukuran CO₂ di atmosfer dalam kolom (Yuen et al., 2022). Citra OCO-2 merupakan citra yang secara khusus merekam kelimpahan karbon dioksida di atmosfer dengan 3 *band*-nya yaitu *band* CO₂ lemah, CO₂ kuat, dan O₂ (NASA, 2023). Kelebihan citra OCO-2 dibandingkan dengan citra-citra dari satelit sejenis lainnya adalah citra OCO-2 merupakan citra *open source*. Selain itu, NASA melalui ARSET-nya gencar mengadakan pelatihan dan menyiapkan tutorial untuk mendukung pemanfaatan citra OCO-2 lebih luas lagi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis hubungan antara luas hutan terhadap konsentrasi gas karbon dioksida. Lebih jauh lagi, hasil penelitian di hutan Amazon dapat dijadikan pembelajaran untuk hutan hujan di Indonesia. Peneliti dan pemerintah dapat bekerja sama untuk mencegah deforestasi maupun kelimpahan XCO₂ di udara.

METODE

Luas hutan didapatkan dengan klasifikasi *Wishart* pada citra Sentinel-1 dan konsentrasi gas karbon dioksida didapatkan dari data hasil akuisisi citra OCO-2. Analisis hubungan dilakukan dengan uji statistik yaitu uji regresi linier dan uji korelasi sederhana.

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada *state* Rondônia, Hutan Hujan Amazon, Brazil. Hutan hujan Amazon merupakan salah satu dari 3 hutan hujan terbesar di dunia. *State* Rondônia pernah menjadi rumah bagi hutan seluas lebih dari 50 juta ha, namun menjadi salah satu wilayah hutan Amazon yang paling parah mengalami deforestasi (NASA, 2023). Pada tahun 2020-2021, Rondônia mengalami deforestasi seluas hampir 3 ribu km² (JEO, 2021).

State Rondônia mencakup 6 *immediate region* yang terdiri dari 52 *municipalities*. Sama seperti Hutan Amazon, hutan di *state* Rondônia kaya akan keanekaragaman hayati yang didominasi oleh palem, tumbuhan merambat, dan epifit sedangkan untuk jenis hutannya adalah hutan ombrofil terbuka, ombrofil lebat, musiman semideciduous, semak belukar, dan vegetasi aluvial. Untuk jenis iklim yang

dimiliki oleh *state* Rondônia adalah iklim khatulistiwa dan iklim sub-tropis.

Brazil dan Indonesia merupakan 2 (dua) dari 3 (tiga) negara yang memiliki hutan hujan tropis terluas di dunia sementara satu negara lainnya adalah Kongo. Hutan hujan Indonesia tersebar khususnya di pulau-pulau besar yaitu Sumatera, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua. Tidak hanya di hutan hujan Brazil atau hutan Amazon saja yang mengalami deforestasi, hutan di negara Indonesia juga mengalami deforestasi. Namun, deforestasi yang terjadi di hutan Amazon lebih masif apabila dibandingkan dengan yang terjadi di Indonesia.

Penelitian ini dapat menentukan langkah yang tepat untuk hutan hujan di Indonesia berkaca dari apa yang telah terjadi di hutan Amazon. Diagram alir pengolahan dapat dilihat pada **Gambar 1**. Data penelitian dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Data Penelitian.

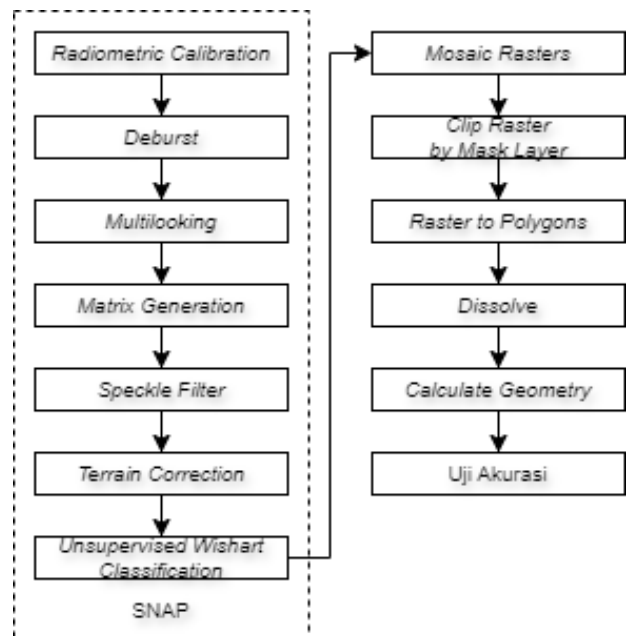
Data	Diunduh melalui
Citra Sentinel-1	https://search.asf.alaska.edu
Citra OCO-2	https://daac.gsfc.nasa.gov
DEM SRTM	diunduh otomatis oleh software SNAP
Batas Administrasi Rondônia	https://www.ibge.gov.br
Titik Validasi	https://brasil.mapbiomas.org/en/pontos-de-validacao

Citra Sentinel-1 untuk Analisis Luas Hutan

Citra Sentinel-1 merupakan citra *open source* yang dimiliki oleh ESA (*European Space Agency*) dengan sensor radarnya adalah sensor *C-band* (ESA, 2023). Citra Sentinel-1 yang digunakan adalah citra dengan jenis data SLC (*Single Look Complex*), mode akuisisi IW (*Interferometric Wide swath*) dengan resolusi spasial 5 × 20 m, *flight direction descending*, dan polarisasi *dualpol VV+VH*. Citra Sentinel-1 dipilih karena merupakan citra SAR (*Synthetic Aperture Radar*) yang bisa melakukan pengamatan pada permukaan bumi tanpa terhalang awan dan hujan sehingga memberi keuntungan apalagi wilayah penelitian merupakan hutan hujan yang presipitasinya tinggi daripada kenampakan alam lainnya. Citra Sentinel-1 digunakan untuk analisis luas hutan. Data yang digunakan adalah bulan Oktober karena ketersediaan data dan kesesuaian musim untuk analisis vegetasi yaitu musim basah. DEM SRTM digunakan untuk *terrain correction* yang merupakan salah satu tahap *pre-processing* citra Sentinel-1.

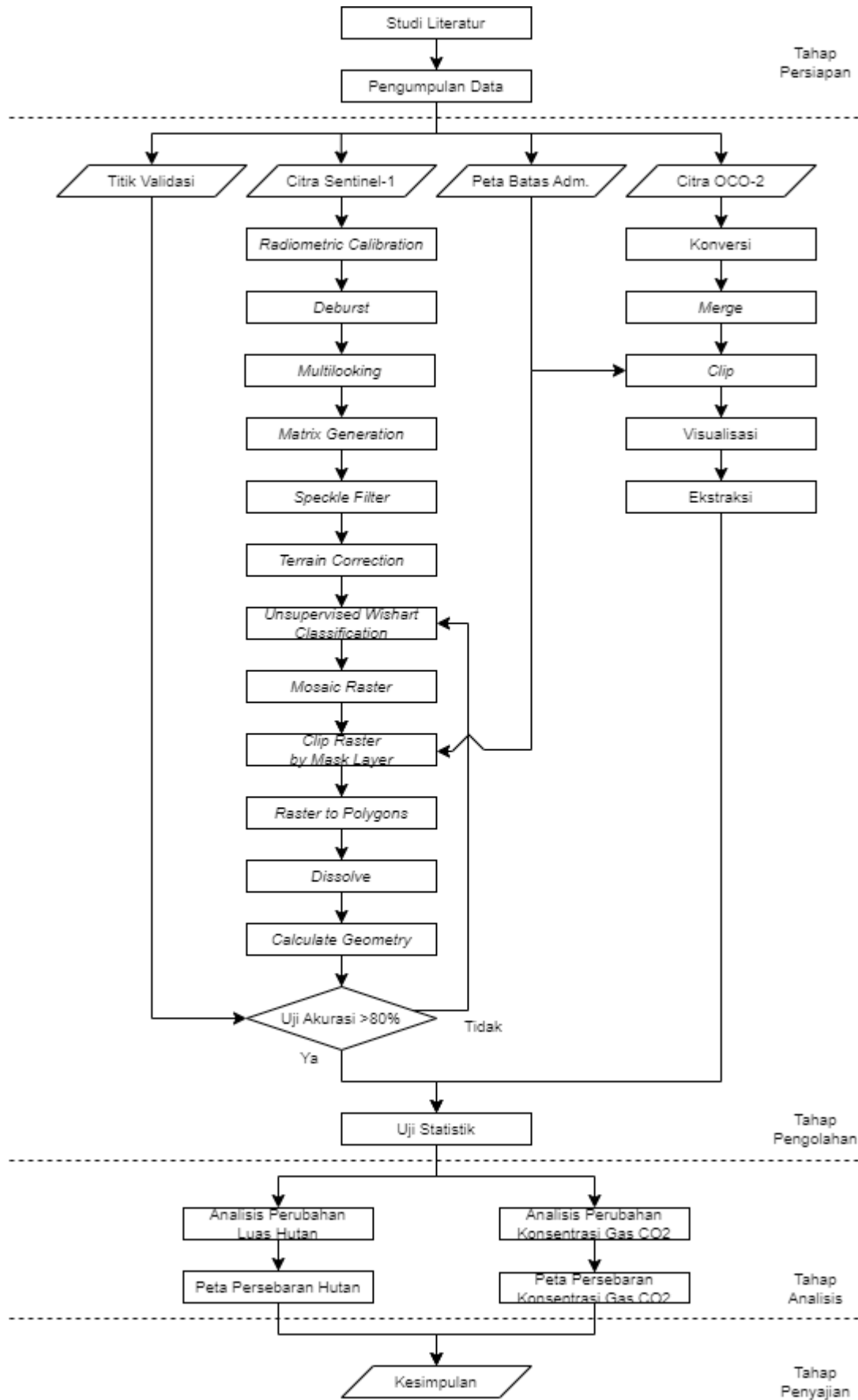
Diagram alir pengolahan citra Sentinel-1 dapat dilihat pada **Gambar 2**. *Radiometric calibration*

dilakukan agar *backscatter* dapat dengan benar menjadi nilai piksel citra (Shafitri et al., 2018). Selain itu, *radiometric calibration* penting dilakukan pada pengolahan data SAR yang dimaksudkan untuk penelitian kuantitatif serta dalam penggunaan citra SAR dengan sensor, waktu, mode, ataupun proses yang berbeda (Veci, 2019). *Deburst* dilakukan agar garis-garis hitam yang memisahkan citra berdasarkan waktu azimuth atau antar *sub-swath* hilang (Aryasatya et al., 2022). *Multilooking* dilakukan agar beberapa gambar tampilan berbeda dari wilayah yang sama dapat tergabung yang berguna dalam penafsiran dan menghilangkan bintik-bintik yang ada pada citra (Shafitri et al., 2018). *Matrix generation* dilakukan agar terbentuk matriks koherensi dan kovarian (Aryasatya et al., 2022). *Speckle filter* dilakukan agar *speckle inherent* (bintik pada citra) yang menimbulkan tekstur *speckle* atau *salt and paper* hilang (Shafitri et al., 2018). *Terrain correction* dilakukan agar distorsi pada citra hilang (Shafitri et al., 2018).



Gambar 2. Diagram alir pengolahan citra Sentinel-1.

Metode analisis luas hutan adalah dengan menggunakan klasifikasi *Wishart*. Klasifikasi *Wishart* adalah metode klasifikasi yang didasarkan pada nilai *entropy*, *isotropy*, dan *alpha angel*, serta tipe *scattering*-nya (Yonezawa et al., 2012). Klasifikasi *Wishart* dapat dilihat pada **Tabel 2**. Bidang klasifikasi H- α dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Tabel 2. Klasifikasi *wishart*.

Kelas	En-tropy	Alpha Angle	Tippe Hamburan
1 complex structures	0,9-1	55-90	Entropy Tinggi Multiple Scattering
2 random anisotropic scatterers	0,9-1	40-55	Entropy Tinggi Vegetation Scattering
3 nonfeasible region	0,9-1	0-40	Entropy Tinggi Surface Scattering
4 double reflection propagation effect	0,5-0,9	50-90	Entropy Menengah Multiple Scattering
5 anisotropic particles	0,5-0,9	40-50	Entropy Menengah Vegetation Scattering
6 random surface	0,5-0,9	0-40	Entropy Menengah Surface Scattering
7 dihedral reflector	0-0,5	47,5-90	Entropy Rendah Multiple Scattering
8 dipole	0-0,5	42,5-47,5	Entropy Rendah Dipole Scattering
9 Bragg surface	0-0,5	0-42,5	Entropy Rendah Surface Scattering

Sumber: Yonezawa, et al., (2012)

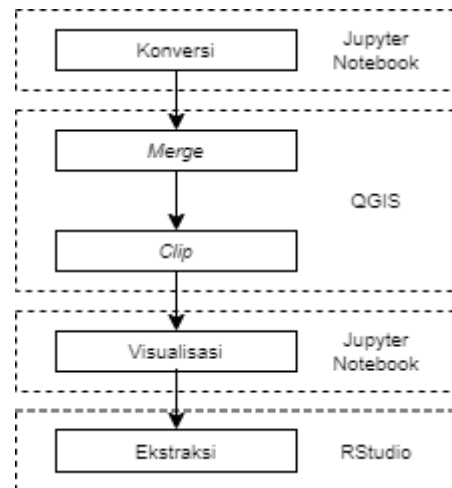
Setelah seluruh *pre-processing* selesai dilakukan kemudian dilanjutkan *main-processing* yaitu *unsupervised wishart classification* (klasifikasi *Wishart*). Setelah pengolahan pada *software* SNAP selesai lalu dilakukan *post-processing* yang terdiri dari *mosaic raster* untuk menggabungkan beberapa *scene* citra dan *clip raster by mask layer* untuk memotong citra sesuai wilayah penelitian. Setelah itu dilakukan proses *raster to polygon* untuk mengkonversi raster menjadi poligon agar bisa dihitung luasnya, proses *dissolve* untuk menggabungkan wilayah dengan atribut (kelas) yang sama, dan akhirnya *calculate geometry* untuk menghitung luas areanya.

Validasi hasil pengolahan klasifikasi *Wishart* citra Sentinel-1 dilakukan dengan uji akurasi menggunakan matriks konfusi. Uji akurasi tersebut membandingkan tutupan lahan hasil klasifikasi *Wishart* dengan tutupan lahan data titik validasi dari MapBiomass.

Citra OCO-2 untuk XCO₂

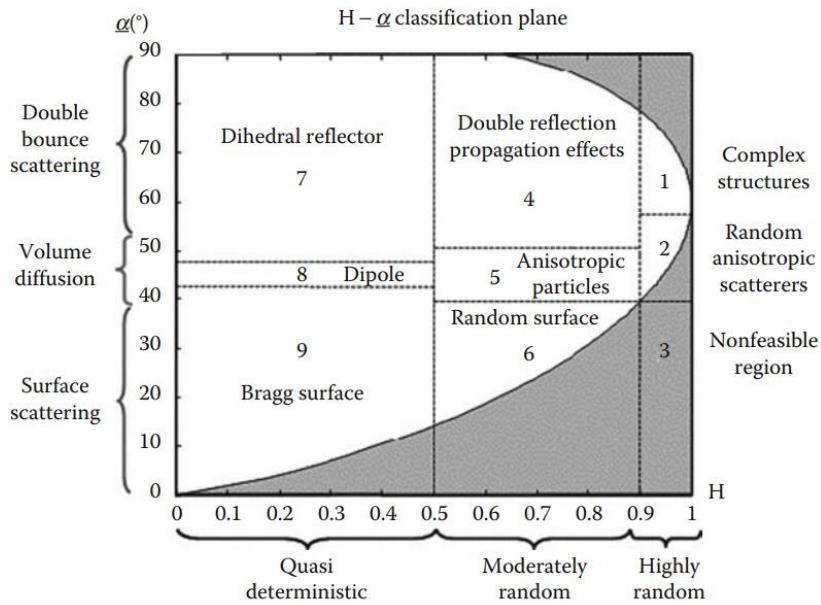
Citra OCO-2 (*Orbiting Carbon Observatory-2*) merupakan citra milik NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Citra tersebut didedikasikan khusus untuk pengamatan karbon dioksida di atmosfer (NASA, 2023).

Citra OCO-2 yang digunakan adalah citra dengan format data OCO2_L2_Lite_FP 10 variabel *xco2* dan *xco2_quality_flag*, format *full physics* (FP) dipilih karena telah dikalibrasi dan divalidasi sedemikian rupa serta variabel *xco2* dipilih karena sesuai dengan tujuan penelitian. Citra OCO-2 memiliki cakupan seluas 10,5 km (1,29 km *cross-track* dan 2,25 km *along-track*). Walaupun akuisisi data citra OCO-2 tidak sebanyak atau serapat citra lainnya seperti citra Landsat-8, Sentinel-2, dan lain-lain tetapi akuisisi data OCO-2 tetap lebih banyak daripada akuisisi data stasiun darat. Oleh karena akuisisi data sedikit jadi data yang digunakan sepanjang tahun sehingga bisa dilakukan analisis bulanan juga.



Gambar 4. Diagram alir pengolahan citra OCO-2.

Diagram alir pengolahan citra OCO-2 dapat dilihat pada **Gambar 4**. Citra OCO-2 yang telah diunduh kemudian dilakukan konversi format karena citra dari NASA berformat *.nc4* tidak bisa diolah dengan menggunakan *software* GIS umum seperti ArcGIS ataupun QGIS (Yuen et al., 2022). Setelah dikonversi menjadi *.json* (vektor) ataupun *.tif* (raster) baru bisa dilanjutkan untuk di-*merge* sesuai rentang waktu penelitian dan di-*clip* sesuai wilayah penelitian. Setelah itu divisualisasi dengan menggunakan Jupyter Notebook (*code script* dapat diakses di <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-measuring-atmospheric-carbon-dioxide-space-support-climate>) dan diekstrak nilai *mean*, *median*, *min*, *max*, *variance*, dan *standard deviation* untuk uji statistik di *software* RStudio.



Sumber: Lee & Pottier, 2009
Gambar 3. Bidang klasifikasi H- α .

Citra OCO-2 yang digunakan telah dikalibrasi dan divalidasi oleh penyedia citra (NASA). Kalibrasi yang diterapkan untuk citra OCO-2 yaitu kalibrasi radiometrik (*brightness*), geometrik, polarimetrik (polarisasi cahaya), dan spektral (NASA, 2023). Sedangkan, validasi yang dilakukan adalah validasi dengan menggunakan data dari stasiun darat TCCON (*Total Carbon Column Observing Network*) serta data dari pengamatan menggunakan pesawat atau perangkat lain dengan RMSE <1,5 ppm (NASA, 2023).

Uji Statistik

Uji statistik dilakukan dengan X atau variabel bebas adalah luas hutan dan Y atau variabel terikat adalah konsentrasi gas karbon dioksida dengan satuan uji-nya adalah *per-immediate region* seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 15**. Nilai luas hutan didapatkan dari hasil *calculate geometry* sedangkan nilai konsentrasi gas karbon dioksida didapatkan dari citra XCO₂ yang nilainya telah ditabulasi sehingga dapat dihitung *mean*, *median*, *min*, *max*, dan *variance*-nya. Untuk uji regresi H0-nya adalah luas hutan berpengaruh signifikan terhadap perubahan konsentrasi gas karbon dioksida. Uji statistik dilakukan pada RStudio dengan menggunakan *coding* 'lm' dan 'cor'.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Luas Hutan

Klasifikasi *Wishart* menghasilkan 9 kelas, setelah dilakukan *calculate geometry* kelas-kelas tersebut dapat diketahui luasnya. Luas kelas hasil klasifikasi *Wishart* disajikan dalam **Tabel 3**.

Tabel 3. Luas kelas hasil klasifikasi *Wishart* di Rondônia dalam satuan hektar (ha).

Kelas	2016	2021	Delta
1 vegetasi sedang	313,451	370,483	57,032 (18,195%)
2 vegetasi sedang	86,590	4920,725	4834,135 (5582,787%)
3 nonfeasible region	510201,570	1147528,540	637326,970 (124,917%)
4 lahan terbuka	30673,014	24296,291	-6376,723 (-20,789%)
5 vegetasi rendah	563794,900	259506,382	-304288,518 (-53,971%)
6 hutan	18106568,068	18086233,677	-20334,391 (-0,112%)
7 vegetasi tinggi dan sedang	38985,085	39888,926	903,841 (2,318%)
8 vegetasi sedang (perkebunan)	850678,691	886950,374	36271,683 (4,264%)
9 perairan dan lahan kosong	4014520,287	3665074,227	-349446,060 (-8,705%)

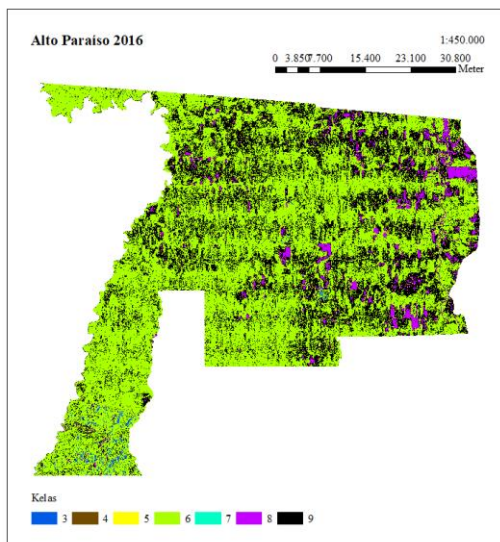
Kelas 1 didefinisikan sebagai vegetasi yang memiliki struktur cabang dan tajuk yang berkembang dengan baik (Lee & Pottier, 2009), hutan yang lebat dan masih bertumbuh (Shafitri et al., 2018), dan hutan lebat (Anisa & Rokhmana, 2019). Kelas 1 tersebut mengalami peningkatan seluas 57,032 ha atau 18,195%. Kelas 2 merupakan kanopi hutan dan permukaan bervegetasi (Lee & Pottier, 2009), daerah non perairan yang hamburannya berasal dari kanopi

hutan (Shafitri et al., 2018), dan kanopi hutan atau wilayah (Anisa & Rokhmana, 2019). Kelas 2 atau kelas vegetasi sedang mengalami penambahan seluas 28,078 ha atau 5582,787%.

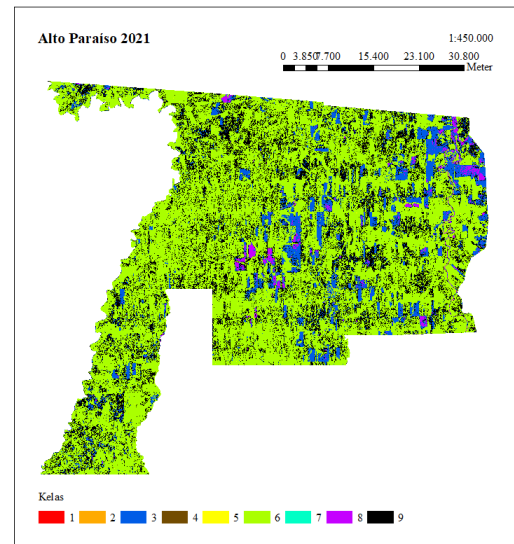
Kelas 3 adalah kelas *nonfeasible region* didefinisikan sebagai zona tidak *feasible* (Shafitri et al., 2018) dan tidak terdefinisi (Aryasatya et al., 2022). Kelas 3 tersebut mengalami peningkatan seluas 637.326,970 ha atau 124,917%. Kelas 4 merupakan kawasan pemukiman dan lahan terbuka (Shafitri et al., 2018) dan pemukiman atau lahan terbangun (Anisa & Rokhmana, 2019). Kelas 4 atau kelas lahan terbuka mengalami pengurangan seluas 6.376,723 ha atau 20,789%. Kelas 5 didefinisikan sebagai pemukiman bervegetasi (Lee & Pottier, 2009), kawasan perkebunan (Shafitri et al., 2018), perkebunan yang vegetasi rapat (Anisa & Rokhmana, 2019), dan kawasan vegetasi rapat (Aryasatya et al., 2022). Kelas 5 tersebut mengalami penurunan seluas 304.288,518 ha atau 53,971%.

Kelas 6 merupakan hamburan dari daun (Lee & Pottier, 2009), vegetasi cukup rapat dan perkebunan (Shafitri et al., 2018), perkebunan jarang (Anisa & Rokhmana, 2019), dan vegetasi jarang (Aryasatya et al., 2022). Kelas 6 atau hutan mengalami pengurangan seluas 20.334,391 ha atau 0,112%. Kelas 7 didefinisikan sebagai perkebunan (Shafitri et al., 2018) dan kawasan perkebunan sedang (Anisa & Rokhmana, 2019). Kelas 7 tersebut mengalami peningkatan seluas 903,841 ha atau 2,318%.

Kelas 8 merupakan vegetasi (Lee & Pottier, 2009), hutan (Shafitri et al., 2018), sawah (Anisa & Rokhmana, 2019), dan ilalang (Aryasatya et al., 2022). Kelas 8 atau vegetasi sedang (perkebunan) mengalami penambahan 36.271,683 ha atau 4,264%. Kelas 9 didefinisikan sebagai air, permukaan tanah yang sangat halus (Lee & Pottier, 2009), tanah kosong dan topografi yang halus (Shafitri et al., 2018), lahan terbuka air (Anisa & Rokhmana, 2019), dan lahan kosong (Aryasatya et al., 2022). Kelas 9 mengalami penurunan seluas 349.446,060 ha atau 8,705%.



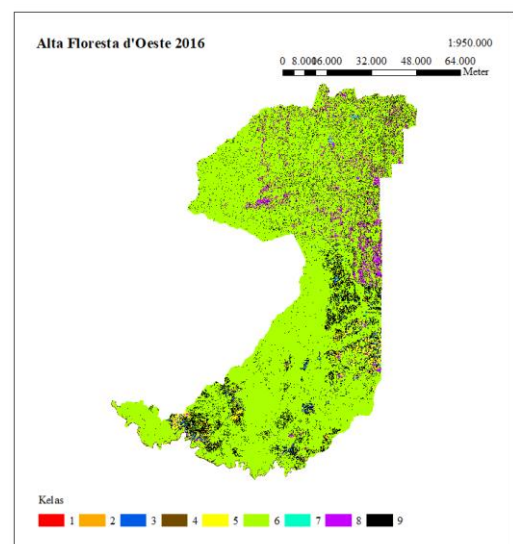
Gambar 5. Hasil klasifikasi *Wishart* Alto Paraíso 2016.



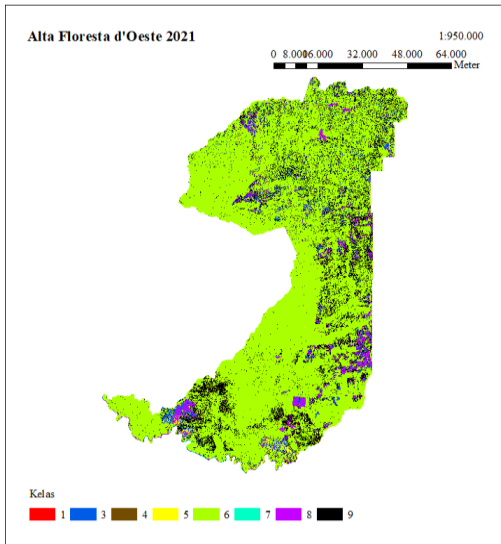
Gambar 6. Hasil klasifikasi *Wishart* Alto Paraíso 2021.

Selama kurun waktu 6 tahun dari 2016-2021, kelas 1, 2, 3, 7, dan 8 mengalami peningkatan dan kelas 4, 5, 6, dan 9 mengalami penurunan. Kelas-kelas vegetasi yaitu kelas 1, 2, 5, 6, 7, dan 8 mengalami pengurangan 282.556,218 ha.

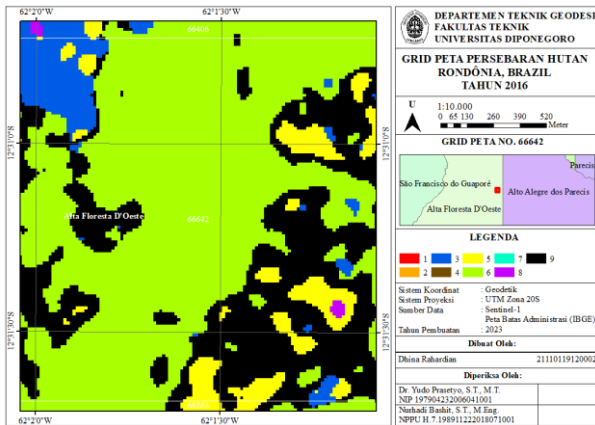
Salah satu penyebab berkurangnya luas hutan di hutan Amazon, Brazil adalah adanya program reforma agraria yang mendorong penduduk membuka lahan pertanian (Filho et al., 2019). Hal ini juga berkaitan dengan kegiatan ekspor komoditas seperti kayu, minyak, daging dan kulit sapi yang proses produksinya erat dengan deforestasi (Butler, 2020). Selain itu, faktor alam juga berpengaruh, seperti musim kemarau yang lebih panjang memperbesar risiko kebakaran hutan (Butler, 2020).



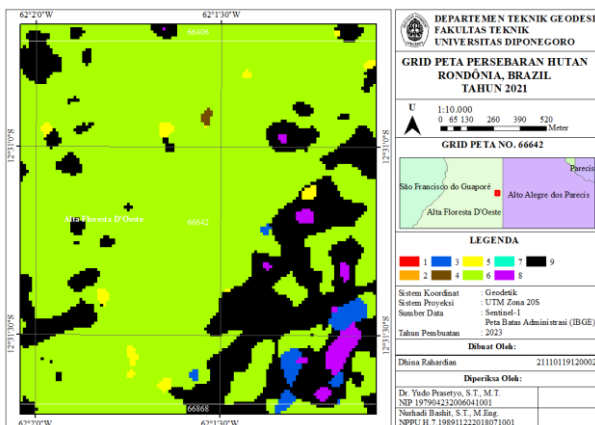
Gambar 7. Klasifikasi *Wishart* Alta Floresta d'Oeste 2016.



Gambar 8. Klasifikasi *Wishart* Alta Floresta d'Oeste 2021.



Gambar 9. Klasifikasi *Wishart* Alta Floresta d'Oeste 2016 Grid Skala 1:10.000.

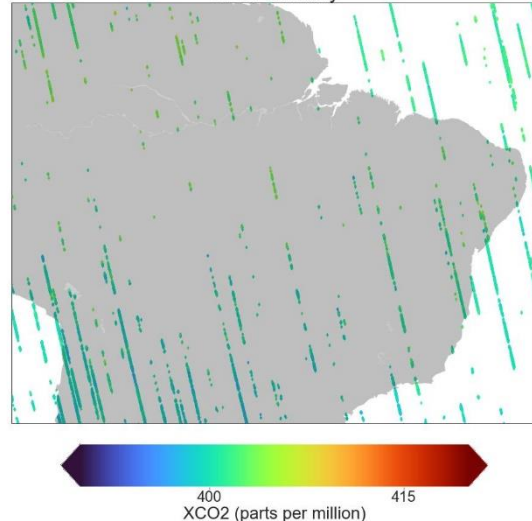


Gambar 10. Klasifikasi *Wishart* Alta Floresta d'Oeste 2021 Grid Skala 1:10.000.

Analisis Konsentrasi Gas Karbon Dioksida

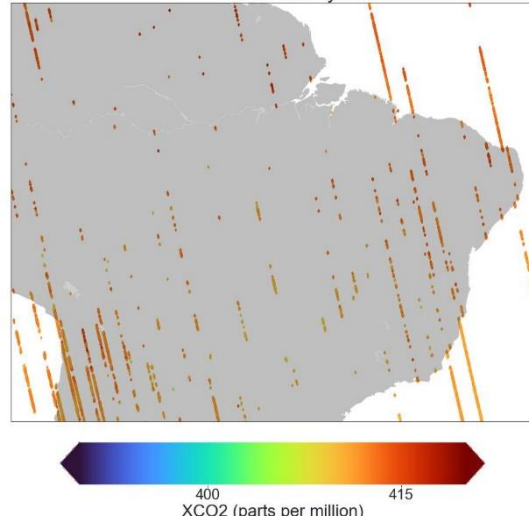
Hasil visualisasi citra OCO-2 dapat dilihat pada Gambar 11-14. Hasil ekstraksi data statistik XCO2 dapat dilihat pada Tabel 4.

Orbiting Carbon Observatory- 2
Atmospheric Carbon Dioxide Concentration
2016-January



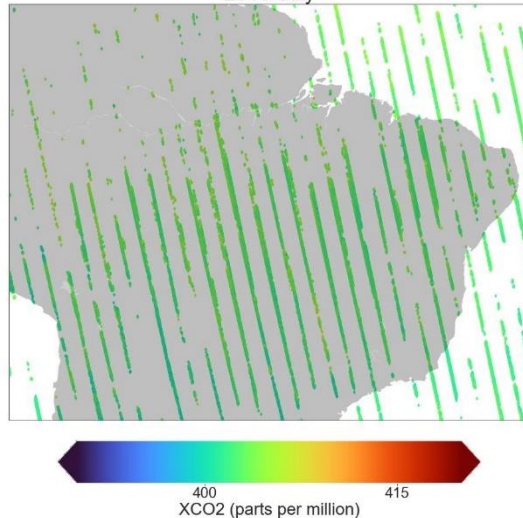
Gambar 11. Hasil Visualisasi OCO-2 Januari 2016.

Orbiting Carbon Observatory- 2
Atmospheric Carbon Dioxide Concentration
2021-January

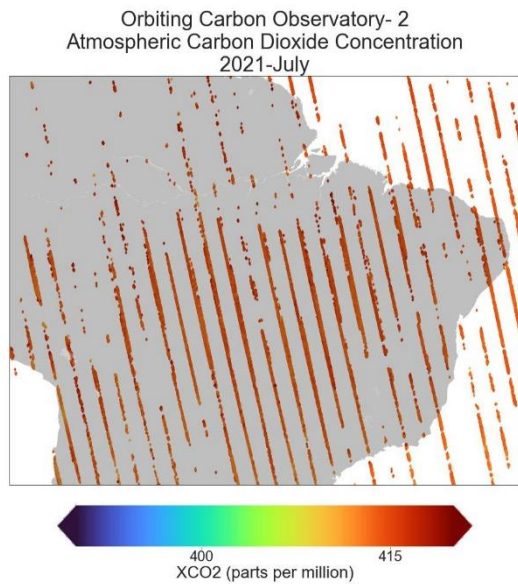


Gambar 12. Hasil Visualisasi OCO-2 Januari 2021.

Orbiting Carbon Observatory- 2
Atmospheric Carbon Dioxide Concentration
2016-July



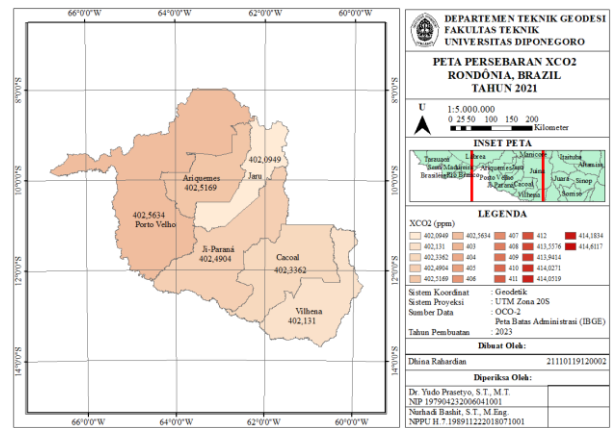
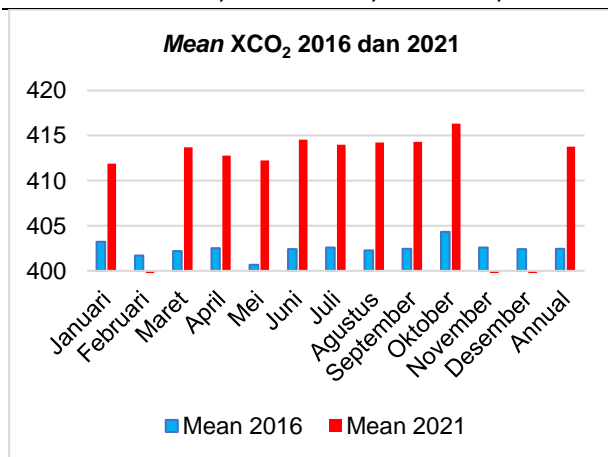
Gambar 13. Hasil Visualisasi OCO-2 Juli 2016.



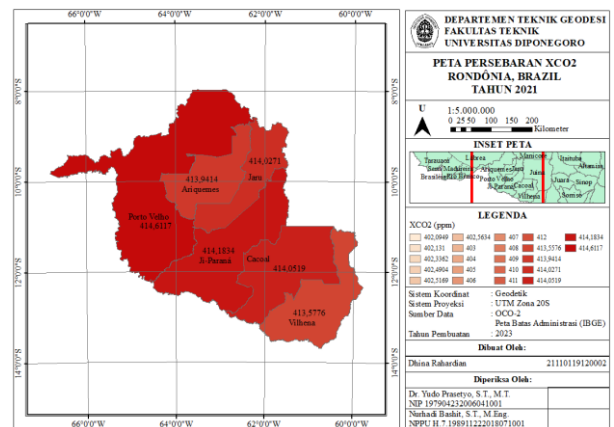
Gambar 14. Hasil Visualisasi OCO-2 Juli 2021.

Tabel 4. Mean XCO₂ bulanan dalam satuan ppm (part per milion).

Bulan	Mean 2016	Mean 2021	Delta
Januari	403,227	411,8865	2,14755
Februari	401,6941	-	
Maret	402,1962	413,7024	2,860843
April	402,5099	412,7848	2,552707
Mei	400,6694	412,2504	2,890413
Juni	402,3972	414,5659	3,024052
Juli	402,5789	414	2,836984
Agustus	402,2622	414,2233	2,973459
September	402,4372	414,3084	2,949827
Oktober	404,3251	416,3396	2,971495
November	402,5923	-	
Desember	402,4041	-	
Annual	402,44113	413,78459	2,14755



Gambar 15. Hasil Visualisasi OCO-2 Tahun 2016.



Gambar 16. Hasil Visualisasi OCO-2 Tahun 2021.

Dari hasil ekstraksi citra OCO-2 didapatkan bahwa XCO₂ bulanan tahun 2016 sebesar 402,44113 ppm dan tahun 2021 sebesar 413,78459 ppm. Artinya peningkatan XCO₂ dari tahun 2016 sampai tahun 2021 sebesar 11,34346 ppm.

Peningkatan konsentrasi gas karbon dioksida yang telah dipaparkan sebelumnya termasuk peningkatan yang besar. Peningkatan tersebut menandakan perubahan iklim yang ekstrim (NatGeo, 2023). Kelimpahan konsentrasi gas karbon dioksida mencapai 400 ppm diperkirakan terjadi pada zaman Pliosen di mana pada zaman itu air laut lebih tinggi 9,1 m dan suhu lebih panas 2-3 °C (NatGeo, 2023).

Hubungan Luas Hutan terhadap Konsentrasi Gas Karbon Dioksida

Uji regresi linier yang dilakukan menunjukkan hasil bahwa pengaruh luas hutan terhadap konsentrasi gas karbon dioksida hanya signifikan dengan kelas 6 (hutan) dan 7 (vegetasi tinggi dan sedang) serta vegetasi total (kelas 1, 2, 5, 6, 7, dan 8) tahun 2021 dengan *p-value* sebesar 0,03424 dan 0,03374 serta 0,04928. Kemudian, uji korelasi menghasilkan hanya kelas 5 tahun 2021 saja yang berkorelasi negatif sedang dengan konsentrasi gas karbon dioksida dengan koefisien korelasi sebesar 0,51797.

KESIMPULAN

Dengan menggunakan citra Sentinel-1 dan klasifikasi *Wishart*, didapati bahwa pengurangan tutupan lahan zona vegetasi di Rondônia tahun 2016 dan 2021 seluas 282.556,218 ha. Kemudian dari hasil akuisisi satelit OCO-2 atau citra OCO-2 didapati kenaikan XCO₂ di wilayah tersebut sebesar 11,343 ppm. Namun, hasil uji statistik menunjukkan tidak ada pengaruh signifikan dan korelasi negatif antar luas hutan dan konsentrasi gas karbon dioksida. Walaupun terjadi pengurangan luas hutan dan kenaikan XCO₂ keduanya tidak saling berkaitan.

Saran untuk penelitian selanjutnya analisis suhu bisa ditambahkan karena suhu dapat mempengaruhi XCO₂ dan dapat dipengaruhi oleh vegetasi, namun apabila faktor alam sudah tidak lagi memegang kendali terhadap kelimpahan XCO₂ maka faktor non alam seperti kebakaran hutan, pemakaian minyak bumi, pembakaran bahan bakar fosil, dan lain-lain bisa dipertimbangkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada keluarga besar Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Diponegoro serta pihak-pihak lain yang telah membantu dalam penelitian ini mulai dari persiapan hingga bisa tersajinya artikel ilmiah ini. Terima kasih juga kepada ESA, USGS, NASA, IBGE, dan MapBiomas yang telah menyediakan data *open source* serta kepada tim ARSET NASA yang telah menyediakan tutorial dan *code script* untuk pengolahan citra OCO-2.

DAFTAR PUSTAKA

- Anisa, R., & Rokhmana, C. A. (2019). *Pemetaan Deforestasi Hutan di Provinsi Sumatera Selatan menggunakan Metode Polarimetrik SAR (Synthetic Aperture Radar)* [Tesis]. Universitas Gadjah Mada.
- Aryasatya, M. F., Prasetyo, Y., & Wahyuddin, Y. (2022). Analisis Dampak Kebakaran Hutan Terhadap Perubahan Tutupan Lahan dan Habitat Kawasan Lindung di Taman Nasional Way Kambas Menggunakan Metode Polarimetrik. *Jurnal Geodesi Undip*.
- Butler, R. A. (2020). *The Amazon Rainforest: The World's Largest Rainforest*. <https://Rainforests.Mongabay.Com/Amazon>.
- Chandler, D. (2023). *Greenhouse Gases*. <https://Climate.Mit.Edu/Explainers/Greenhouse-Gases>.
- Chhabra, A., & Gohel, A. (2019). Dynamics of atmospheric carbon dioxide over different land cover types in India. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7681-z>
- Crisp, D., O'Dell, C., Eldering, A., Fisher, B., Oyafuso, F., Payne, V., & Drouin, B. (2021). *OCO-2 Level 2 Full Physics Algorithm Theoretical Basis Document Version 3.0 - Rev 1*. Jet Propulsion Laboratory.
- ESA. (2023). *Sentinel-1*. <https://Sentinel.Esa.Int/Web/Sentinel/Missions/Sentinel-1>.
- Filho, E. R., Brennecke, K., Bertipaglia, L. M. A., & Sgavioli, S. (2019). Uso e ocupação do solo da microrregião de Ariquemes: fatores do desmatamento, por Edson Resende Filho, Káthery Brennecke, Liandra M. A. Bertipaglia e Sarah Sgavioli. *EcoDebate*.
- JEO. (2021). *Deforestation in the Legal Amazon grows 22% in 2021, reaching the highest rate in 15 years*. <https://Infoamazonia.Org/En/2021/11/19/Deforestation-Amazon-Grows-22-in-2021/#:~:Text=Compared%20to%20last%20year%2C%20deforestation%20in%20the%20state,87.25%25%20of%20estimated%20deforestation%20in%20the%20Legal%20Amazon>.
- Kshetri, T. (2018). NDVI, NDBI and NDWI Calculation using Landsat 7 and 8. *GeoWorld, II*.
- Lee, J.-S., & Pottier, E. (2009). *Polarimetric Radar Imaging*. CRC Press.
- NASA. (2023a). *Calibration Overview*. <https://Ocov2.Jpl.Nasa.Gov/Science/Calibration-Overview>.
- NASA. (2023b). *Deforestation*. <https://Earthobservatory.Nasa.Gov/World-of-Change/Deforestation>.
- NASA. (2023c). *Orbiting Carbon Observatory-2*. <https://Ocov2.Jpl.Nasa.Gov>.
- NASA. (2023d). *Validation*. <https://Ocov2.Jpl.Nasa.Gov/Science/Validation>.
- NatGeo. (2023). *Climate Milestone: Earth's CO2 level Passes 400 ppm*. National Geographic.
- Putra, P. P., Prasetyo, Y., & Haniah. (2015). Analisis Tutupan Vegetasi Menggunakan Metode Dekomposisi Polarimetrik. *Jurnal Geodesi Undip*.
- Rossi, F. S., de Araújo Santos, G. A., de Souza Maria, L., Lourençoni, T., Pelissari, T. D., Della-Silva, J. L., Oliveira Júnior, J. W., Silva, A. de A. e, Lima, M., Teodoro, P. E., Teodoro, L. P. R., de Oliveira Júnior, J. F., La Scala Jr, N., & Silva Junior, C. A. da. (2022). Carbon dioxide spatial variability and dynamics for contrasting land uses in central Brazil agricultural frontier from remote sensing data. *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103809>
- Santos, G. A. de A., Morais Filho, L. F. F., Meneses, K. C. de, Silva Junior, C. A. da, Rolim, G. de S., & La Scala, N. (2022). Hot spots and anomalies of CO2 over eastern Amazonia, Brazil: A time series from 2015 to 2018. *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114379>
- Shafitri, L. D., Prasetyo, Y., & Haniah. (2018). Analisis Deforestasi Hutan di Riau dengan Metode Polarimetrik dalam Pengindraan Jauh. *Jurnal Geodesi Undip*, 212–222.
- Varghese, A. O., & Joshi, A. K. (2015). Polarimetric classification of C-band SAR data for forest density characterization. *Current Science*, 100–106.
- Veci, L. (2019). *SENTINEL-1 Toolbox Polarimetric Tutorial*. ESA.
- Yonezawa, C., Watanabe, M., & Saito, G. (2012). Polarimetric Decomposition Analysis of ALOS PALSAR Observation Data before and after a Landslide Event. *Remote Sensing*, 2313–2328.
- Yuen, K., Limbu, S., & Thompson, C. (2022). *How to Access and Visualize OCO-2 and OCO-3 Data*. National Aeronautics and Space Administration.