

Pendugaan Cadangan Karbon Dengan Citra Sentinel-2B dan Terrestrial Laser Scanner Di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK)

Muhammad Rafii Nur Fauzan^a, Yohanes Budi Sulistioadi^{b,c*}, Ali Suhardiman^b

^aProgram Studi Kehutanan Program Magister, ^bSekolah Pascasarjana Ilmu Lingkungan, ^cFakultas Kehutanan, Universitas Mulawarman

Research Article

DOI:

10.22146/jgst.v1i1.8918

correspondence:

bsulistioadi@unmul.ac.id

Article history:

Received:

14-07-2022

Accepted:

29-11-2023

Published:

28-12-2023

ABSTRACT

Measurement of forest carbon on the ground on a large scale is time-consuming and expensive. This research utilized remote sensing with Sentinel-2B image through its Vegetation Index and related those values with those obtained from field measurements and Terrestrial Laser Scanner (TLS). This study specifically compares the forest stand carbon value using TLS and field measurements and links it to the vegetation index. This study transforms the vegetation indices, i.e.: Transformed Vegetation Index (TVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Simple Ratio (SR) from Sentinel-2B imagery and relates them with field measurements and TLS. The calculation of carbon in forest stands using TLS revealed an average carbon of 151.35 ton/Ha. In contrast, in the field measurements, carbon was measured at 149.81 ton/Ha, and statistically, there was no difference between these two measurements. The relationship between the vegetation index and field measurements showed the best coefficient of correlation of TVI with $(r) = 0.784$ and $(R^2) = 0.524$. The relationship between the vegetation index and TLS measurements showed the best coefficient of correlation of TVI with $(r) = 0.759$ and the coefficient of determination $(R^2) = 0.577$.

Key words: Vegetation Index, Field Measurements, Terrestrial Laser Scanner (TLS)

INTISARI

Pengukuran karbon atas permukaan pada skala luas membutuhkan waktu dan biaya yang besar. Pemanfaatan penginderaan jauh dengan menggunakan Indeks Vegetasi Citra Sentinel-2B yang dihubungkan dengan pengukuran lapangan dan Terrestrial Laser Scanner (TLS) diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengukuran karbon. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung karbon tegakan hutan menggunakan TLS dan pengukuran lapangan serta menghubungkan dengan indeks vegetasi. Penelitian ini dilakukan dengan mentransformasikan indeks vegetasi Transformed Vegetation Index (TVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Simple Ratio (SR) dari citra sentinel 2B dan menghubungkannya dengan pengukuran lapangan dan TLS. Hasil perhitungan karbon pada tegakan hutan menggunakan TLS didapatkan rata-rata karbon sebesar 151.35 ton/Ha sedangkan pada pengukuran lapangan didapatkan karbon sebesar 149.81 ton/Ha dan secara statistik tidak terjadi perbedaan dari kedua pengukuran tersebut. Hubungan antara indeks vegetasi dengan pengukuran lapangan diperoleh nilai korelasi terbaik TVI dengan Koefisien regresi $(r) = 0.784$ dan Koefisien Determinasi $(R^2) = 0.524$. Hubungan antara indeks vegetasi dengan pengukuran TLS diperoleh nilai korelasi terbaik TVI dengan $(r) = 0.759$ dan koefisien determinasi $(R^2) = 0.577$.

Kata kunci: Indeks Vegetasi, Pengukuran Lapangan, Terrestrial Laser Scanner (TLS)

1. Pendahuluan

Indonesia sebagai salah satu negara penyumbang emisi karbon terbesar di dunia telah berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca salah satunya berasal dari karbon hutan (Majid, 2015). Hal ini telah diutarakan oleh Presiden Republik Indonesia Joko Widodo dalam konferensi COP ke 21 di Madrid untuk menurunkan GRK sebesar 29% (Anonim, 2020). Dalam pengukuran karbon hutan parameter yang diukur adalah perubahan cadangan biomassa hutan (Krisnawati, 2015).

Cadangan karbon adalah karbon yang tersimpan, baik diatas permukaan tanah seperti biomasa tanaman ataupun di dalam tanah seperti bahan organik tanah (Ginting, 2018). Penghitungan perubahan cadangan karbon hutan didapatkan dengan mengukur cadangan aktual biomasa pada periode awal dan akhir perhitungan dengan satuan ton/ha (Tosiani, 2015).

Pendugaan biomassa dapat dilakukan dengan metode memanen secara langsung dan tidak langsung. Metode langsung dilakukan dengan menebang tegakan sehingga mendapatkan data kuantitatif tegakan. Metode tidak langsung dilakukan dengan alometrik untuk mencari keterkaitan antara dimensi pohon dengan biomassa (Hairiah, 2007).

Pengukuran karbon dalam skala luas membutuhkan waktu dan biaya yang besar. Pemanfaatan penginderaan jauh telah banyak dilakukan dengan memanfaatkan citra satelit Sentinel-2B dikarenakan lebih murah dan cepat dalam pemetaan karbon (Myeong, 2006). Estimasi biomassa melalui Citra Sentinel-2B dapat dilakukan dengan pendekatan indeks vegetasi (Rahmawati, 2012; Frananda, 2015).

Dalam penelitian Frananda, 2015, dengan judul komparasi indeks vegetasi untuk estimasi karbon hutan mangrove di Tanaman Nasional Alas Purwo Banyuwangi Jawa Timur yang membandingkan antara indeks vegetasi SR, NDVI, TVI, RVI, SAVI, EVI didapatkan indeks vegetasi TVI dengan Koefisien Determinasi 0,63. Askar et. Al., (2018) melakukan pendugaan biomassa Hutan Gunung Kidul Yogyakarta dengan Citra Sentinel-2B dengan indeks vegetasi Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dengan Koefisien Determinasi sebesar 0,8 dan Simple Ratio (SR) memiliki Koefisien Determinasi sebesar 0,85.

Teknologi Terrestrial Laser Scanner (TLS) merupakan sensor jarak jauh di tanah yang mampu mengambil data titik sangat rapat dan akurat berupa sekumpulan kordinat XYZ dan memungkinkan untuk ekstraksi bentuk tiga dimensi pohon (Vidyan, 2013). Pemanfaatan Terrestrial Laser Scanner untuk mengukur diameter tegakan Hutan di Anyer Hitam, Malaysia memiliki akurasi yang sangat tinggi dibandingkan dengan pengukuran lapangan (Bazew, 2018).

Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Diklat Kehutanan Fakultas Kehutanan Universitas Mulawarman merupakan kawasan hutan tropis basah dataran rendah dengan vegetasi hutan sekunder tua (Karyati, 2016). Kawasan ini merupakan satu-satunya hutan tropis basah di kota Samarinda dan mengandung cadangan karbon hutan yang sangat penting dengan 70 jenis pohon yang terdapat didalamnya. Oleh sebab itu peneliti merasa penting untuk melakukan penelitian ini untuk membandingkan nilai spektral citra Sentinel-2B dengan nilai tegakan yang diperoleh dari Terrestrial Laser Scanner (TLS) dan pengukuran lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung karbon dalam tegakan hutan dengan menggunakan Terrestrial Laser Scanner (TLS), membandingkannya dengan data pengukuran langsung dilapangan, serta mengaitkan hasil tersebut dengan indeks vegetasi dari citra Sentinel-2B guna mendapatkan pemahaman yang komprehensif.

2. Bahan dan Metode

2.1. Lokasi dan Data

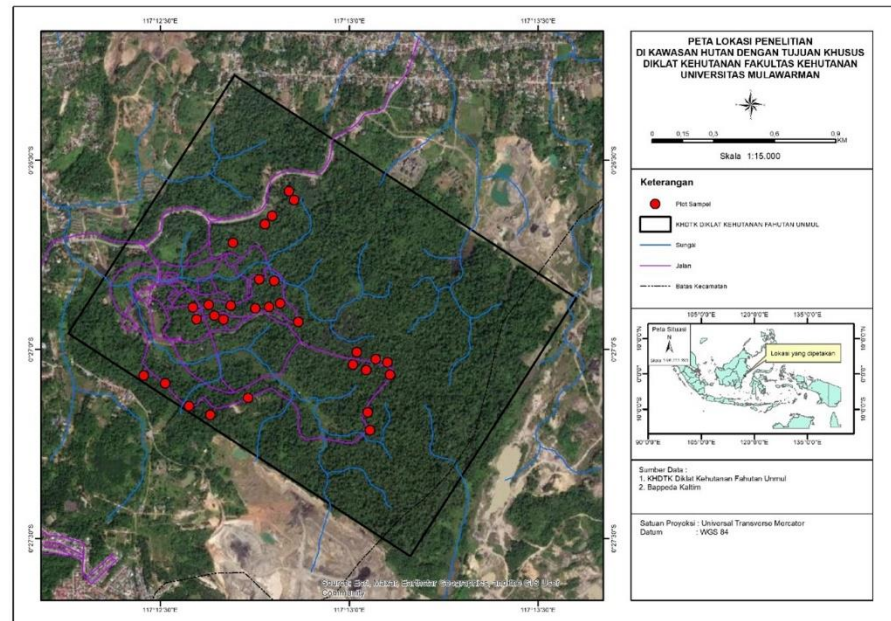
Penelitian pendugaan cadangan karbon dengan citra sentinel-2B dengan pengukuran lapangan dan TLS dilaksanakan di Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus Diklat Kehutanan (KHDTK Diklat Kehutanan) Fakultas Kehutanan Universitas Mulawarman di Kelurahan Tanah Merah Kecamatan Samarinda Utara Kota Samarinda.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) RIEGL VZ-400, GPS, Avenza Map, Tallysheet, Leica Disto D510, Meteran 30 m, Klinometer *Phi-band*, Software ArcGIS 10.4, RiScan Pro V2.1, ENVI, Microsoft office, Curve expert.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Citra Sentinel-2B perekaman tanggal 29 Desember 2018, tallysheet, kertas label, *circular reflector* dan *cylindrical retro-reflector*, *Tree Tag*.

2.2. Pra-Pemrosesan Data

Data citra Sentinel-2B dilakukan pre-processing dengan tahapan cropping citra dengan batas AOI dengan software ArcMap 10.4, Koreksi Dark Object Subtraction dengan software ENVI dan koreksi Geometrik dengan ArcMap 10.4. Lokasi penelitian dapat dilihat pada (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian.

2.3. Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian ini diawali dengan melakukan transformasi indeks vegetasi *Transformed Vegetation Index* (TVI), *Simple Ratio* (SR) dan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) sebagai berikut :

Tabel 1. Persamaan Indeks Vegetasi

Persamaan Indeks Vegetasi	Sumber
$NDVI = \frac{Band\ 8 - Band\ 4}{Band\ 8 + Band\ 4}$	(Richter et al, 2005)
$SR = \frac{Band\ 8}{Band\ 4}$	(Manso et al, 2016)
$TVI = \sqrt{\frac{Band\ 8 - Band\ 4}{Band\ 8 + Band\ 4} + 0,5}$	(Sobieraj, 2004)

Hasil transformasi indeks vegetasi selanjutnya dilakukan ekstraksi untuk mendapatkan nilai piksel pada setiap plot penelitian.

Penentuan plot sampel di lapangan dilakukan dengan menggunakan metode purposive sampling yaitu memilih tempat yang mudah diakses dari jalan. Pengukuran dilakukan pada pohon-pohon yang memiliki diameter >10 cm. Pengambilan data di lapangan dilakukan dengan menggunakan phi band, Leica Disto D510 dan Terrestrial Laser Scanner (TLS). Hasil pengukuran tegakan dilakukan konversi untuk mendapatkan biomassa atas permukaan tegakan menggunakan alometrik Chave, 2014:

$$AGB = 0,0673 \times (\rho \times D^2 \times H)^{0,976} \tag{1}$$

Dimana, AGB dalam kg, ρ menggunakan 0,59 g/cm³, d dalam cm dan H dalam m. AGB selanjutnya dilakukan konversi menjadi carbon dengan mengalikan dengan 0.47 (IPCCC, 2006) dengan Ton/ha.

Hasil pengukuran diperoleh 30 data stok karbon pengukuran lapangan dan TLS. Selain itu dari proses tumpang susun (*overlay*) titik lokasi 30 plot sampel dengan 3 data spasial hasil transformasi spektral Sentinel-2B yakni NDVI, SR dan TVI menggunakan ArcGIS, diperoleh 30 data lagi berupa nilai piksel dari masing-masing citra NDVI, SR dan TVI. Untuk menguji apakah stok karbon dari pengukuran plot sampel dan TLS sama maka dilakukan Uji T dua sampel berpasangan (*paired two-sample for means*). Uji T dalam penelitian ini menggunakan tingkat signifikansi (α) sebesar 5% (0,05). Adapun rumus Uji T yang digunakan adalah untuk menguji perbedaan rata-rata dua sampel yang berpasangan (*paired two-sample for means*) sebagai berikut:

$$t_{hit} = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \quad s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \tag{2}$$

$$d_i = x_{i1} - x_{i2} \tag{3}$$

Selanjutnya untuk mengetahui apakah indeks vegetasi (NDVI, SR dan TVI) dari pengolahan citra Sentinel-2B dapat menjadi penduga (predictor) stok karbon yang cukup baik maka dibangun model persamaan regresi non linear (Nabila, 2019), yaitu:

$$\text{Regresi Power} \quad y = aX^b \tag{4}$$

$$\text{Regresi Power} \quad y = a + b \ln(x) \tag{5}$$

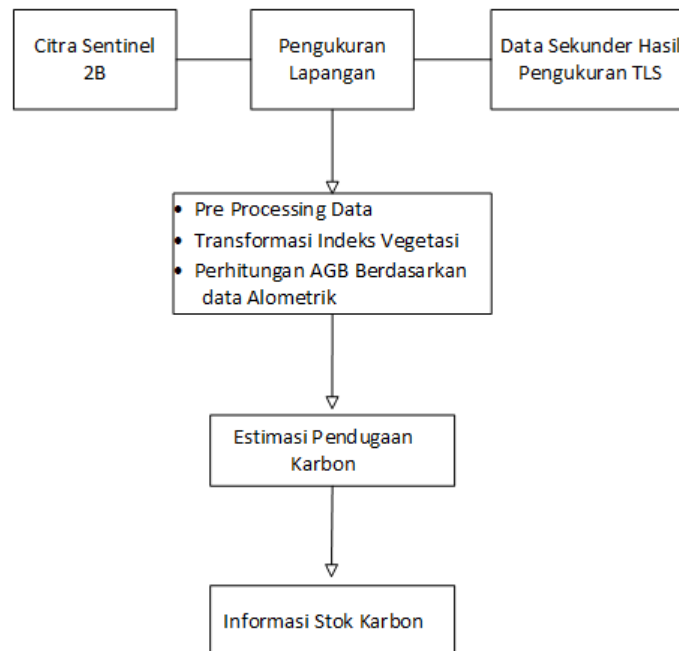
Model persamaan dibangun dari 70% data dari plot sampel dan 30% sisanya digunakan sebagai validator. Untuk memilih model persamaan terbaik maka digunakan nilai koefisien korelasi (r) dan koefisien determinasi (R²) serta uji validasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) dan Bias.

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sqrt{(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n})(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n})}} \tag{6}$$

$$R^2 = \frac{((n)(\sum xy) - (\sum x)(\sum y))^2}{(n(\sum x^2) - (\sum x)^2)(n(\sum y^2) - (\sum y)^2)} \tag{7}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \tag{8}$$

$$e = \sum \left\{ \frac{(E - O)}{n} \right\} \times 100\% \tag{9}$$



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

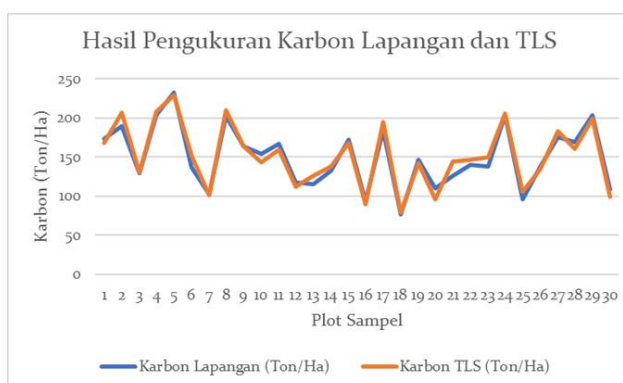
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Uji Beda Rata-Rata Stok Karbon Plot Sampel dan TLS

Hasil Pengukuran pada tegakan pohon di lapangan yang telah dilakukan pada 30 Plot dengan parameter yang diukur diameter dan tinggi pohon dengan pengukuran lapangan dengan menggunakan Phiband dan Leica Disto D510. Proses Konversi karbon dilakukan menggunakan alometrik Chave (2014).

Hasil pengambilan data TLS di lapangan diekstraksi menggunakan software RiScan Pro V2.1 sehingga didapatkan kumpulan data titik (*Point Cloud*) individu pohon. Selanjutnya dilakukan pengukuran diameter dan tinggi pada software tersebut. Hasil dari data titik selanjutnya dilakukan konversi untuk mendapatkan karbon per hektar. Pengukuran TLS memiliki keterbatasan yaitu 619 dari 699 pohon atau 88,6% pohon yang dapat diidentifikasi dikarenakan penanda pohon tidak terlihat dari kamera TLS dan akurasi sangat dipengaruhi kemampuan data titik dalam menampilkan bentuk pohon (Tsfay, 2019 dan Pitkanen, 2021).

Pengukuran karbon dengan pengukuran lapangan dan TLS secara tren memiliki hasil yang tidak jauh berbeda hanya saja pada setiap plot pengukuran TLS secara konsisten memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengukuran lapangan sebagaimana disajikan pada (Gambar 3).



Gambar 3. Grafik Pengukuran Karbon Lapangan dan TLS. Data

Pengujian beda rata-rata stok karbon dilakukan dengan mengambil sebanyak 30 plot sampel dan membandingkan hasil pengukuran lapangan dengan TLS menggunakan Uji T (Paired two-sample for means). Uji T dilakukan untuk menguji apakah nilai rata-rata tersebut berasal dari dua kelompok data yang berbeda signifikan atau sebenarnya sama saja. Hasil Uji T pada taraf kepercayaan 95% diperoleh angka 0,97 yang menggambarkan bahwa pengukuran antara pengukuran lapangan dengan TLS tidak signifikan. Detil uji statistik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Uji T untuk perhitungan karbon antara TLS dan Pengukuran Lapangan

Parameter	TLS	Pengukuran Lapangan
Rataan	149,813	151,346
Varian	1533,236	1635,689
Jumlah Plot	30	30
Pearson Correlation	0,98	
Derajat bebas	29	
T Hitung	0,97	
t Critical one-tail	1,69	
t Critical two-tail	2,04	

Hasil uji T perhitungan karbon antara TLS dengan pengukuran lapangan pada taraf 95% didapatkan nilai T Hitung < T Tabel (*t critical two-tail*) yang mana memiliki arti bahwa H_0 diterima dan secara statistik pada taraf 95% tidak terdapat perbedaan antara hasil pengukuran menggunakan TLS dan pengukuran Lapangan. Liang (2016) mengemukakan TLS memiliki akurasi tinggi untuk pengukuran DBH dan pengukuran karbon dengan beberapa alometrik model dan hampir di semua negara.

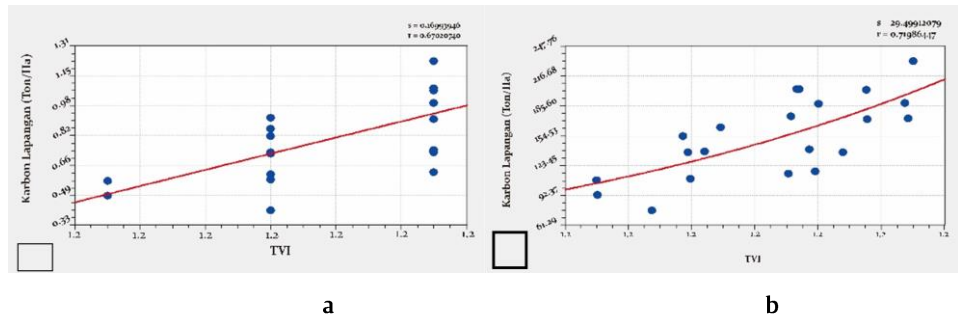
3.2. Hubungan Indeks Vegetasi dengan Pengukuran Lapangan

Transformasi indeks vegetasi pada citra Sentinel-2B merupakan suatu kombinasi matematis saluran atau band yang menunjukkan kondisi vegetasi hijau (Khasanah, 2020). Penggunaan indeks hasil korelasi dari 21 plot yang diuji antara indeks vegetasi dengan nilai karbon pengukuran lapangan berkisar antara 0,656 sampai dengan 0,724. Indeks vegetasi yang memiliki persamaan terbaik adalah TVI baik logaritma ataupun Hyperbolic.

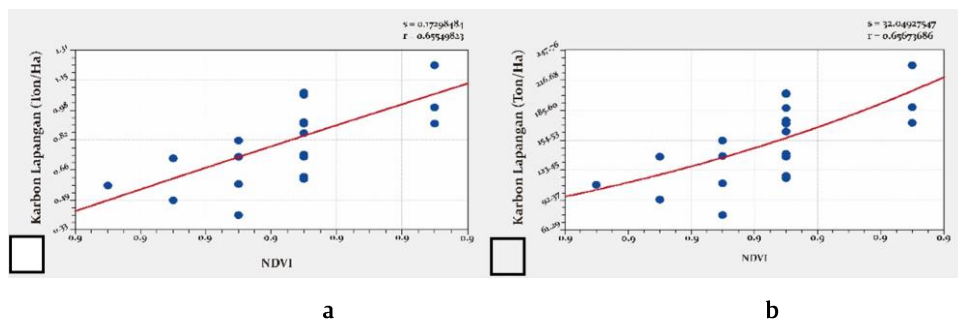
Tabel 3. Nilai Korelasi antara Indeks Vegetasi dengan Pengukuran Karbon Lapangan

Index Vegetasi	Model Persamaan	Persamaan Peduga	Korelasi r	Determinasi R ²	Standar Error	Keterangan
TVI	Logaritma	Stok Karbon = -1016.58 + 6931,56ln(TVI)	0,724	0,524	29,308	Korelasi Kuat
	Power	Stok Karbon = 0.065TVI ^{45.877}	0,72	0,518	29,499	Korelasi Kuat

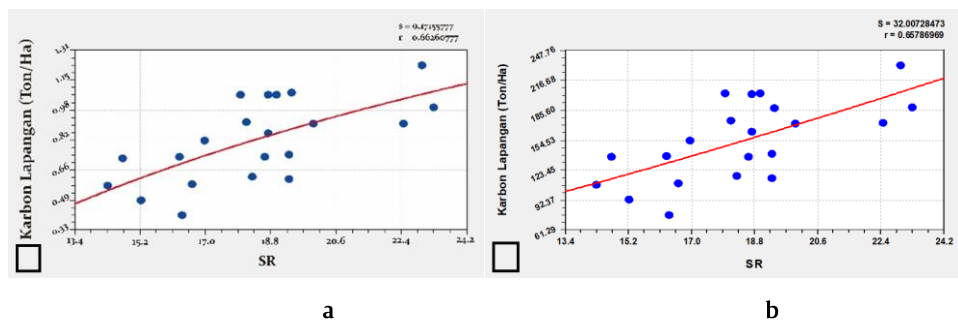
NDVI	Logaritma	Stok Karbon = 364,45 + 1949,51ln(NDVI)	0,661	0,437	31,87	Korelasi Kuat
	Power	Stok Karbon = 575.069NDVI ^{12.33}	0,656	0,431	32,049	Korelasi Kuat
SR	Logaritma	Stok Karbon = -447.15 + 206.75ln(SR)	0,663	0,439	31,81	Korelasi Kuat
	Power	Stok Karbon = 3,421SR ^{1.304}	0,658	0,433	32,01	Korelasi Kuat



Gambar 4. Persamaan TVI dan Pengukuran Lapangan. (a. Persamaan Logaritma; b. Persamaan Power)



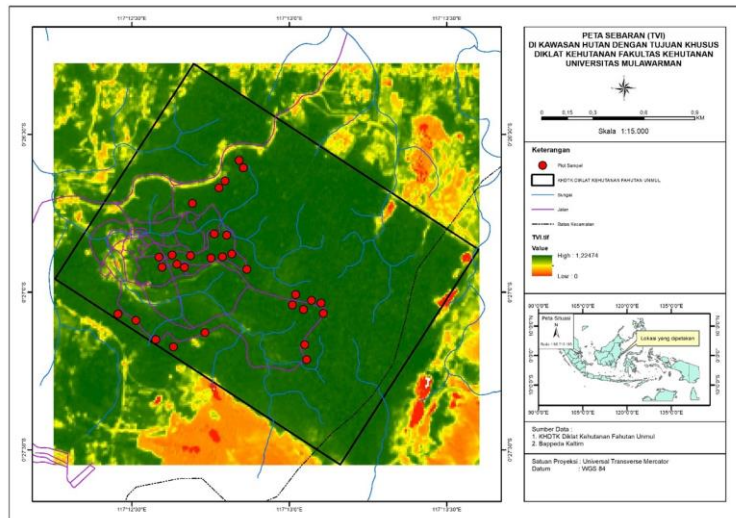
Gambar 5. Persamaan NDVI dan Pengukuran Lapangan. (a. Persamaan Logaritma; b. Persamaan Power)



Gambar 2. Persamaan SR dan Pengukuran Lapangan (a. Persamaan Logaritma; b. Persamaan Power)

3.3. Transformed Vegetation Index (TVI)

Hasil ekstraksi Transformed Vegetation Index (TVI) citra sentinel 2B dari 21 plot memiliki nilai TVI berkisar antara 1,172 s/d 1,191 dengan peta pada (Gambar 7).

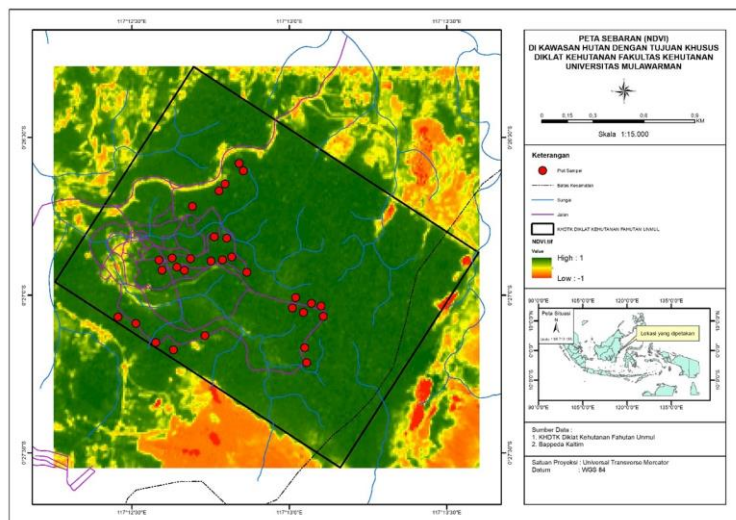


Gambar 7. Peta Sebaran TVI.

Nilai Korelasi TVI dan nilai stok karbon dengan pengukuran lapangan didapatkan model persamaan logaritma Stok Karbon = $-1016.58 + 6931,56\ln(\text{TVI})$ memiliki koefisien Korelasi (r) terbaik yaitu sebesar 0,724 meskipun tidak berbeda jauh dengan persamaan Power dengan error sebesar 29,308 seperti pada Gambar 3-1. Frananda (2015) mengemukakan TVI baik dalam memprediksi nilai karbon dikarenakan menggunakan ρ blue dan ρ green yang mengakibatkan lebih baik bila dibandingkan transformasi yang hanya menggunakan ρ red dan ρ NIR dalam formulanya.

3.4. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Hasil ekstraksi Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) citra sentinel 2B dari 21 Plot memiliki Nilai NDVI berkisar antara 0,859 s/d 0,919 dengan peta pada (Gambar 8).

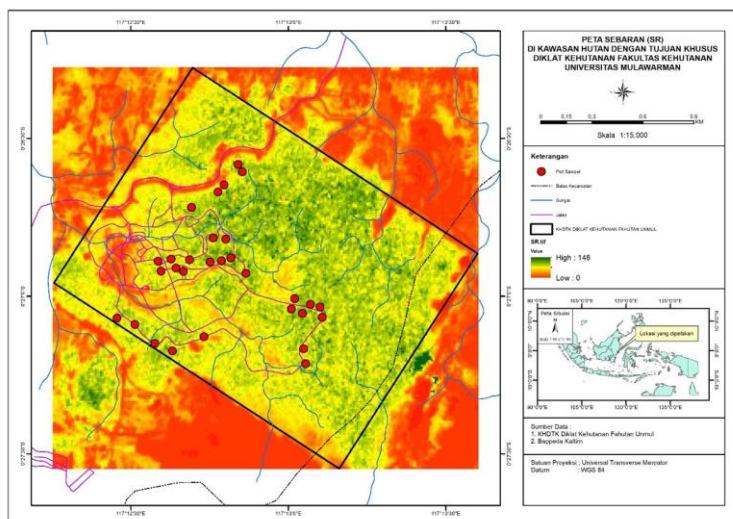


Gambar 8. Peta Sebaran NDVI.

Nilai korelasi antara NDVI dan nilai karbon dengan pengukuran menggunakan TLS didapatkan model persamaan logaritma Stok Karbon = $364,45 + 1949,51\ln(\text{NDVI})$ memiliki koefisien Korelasi (r) terbaik yaitu sebesar 0,661 meskipun tidak berbeda jauh dengan persamaan Power dengan nilai standar error sebesar 31,87 seperti pada (Gambar 8). Karmila (2020) menambahkan bahwa NDVI memiliki hubungan yang positif untuk pendugaan cadangan karbon.

3.5. Simple Ratio (SR)

Hasil ekstraksi Simple Ratio (SR) citra sentinel 2B dari 21 Plot memiliki nilai SR berkisar antara 13,17 s/d 23,33 dengan peta pada (Gambar 9).



Gambar 9. Peta Sebaran NDVI.

Nilai korelasi antara SR dan nilai karbon dengan pengukuran lapangan didapatkan model persamaan logaritma Stok Karbon = $-447.15 + 206.75 \ln(SR)$ memiliki koefisien Korelasi (r) terbaik yaitu sebesar 0,663 meskipun tidak berbeda jauh dengan persamaan Power dengan nilai standar error sebesar 31,81 seperti ditunjukkan pada (Gambar 9).

3.6. Uji Validasi

Uji Validasi dilakukan pada 9 plot dengan parameter berupa nilai indeks vegetasi terbaik, hasil pengukuran karbon lapangan dan hasil pengukuran karbon menggunakan TLS. Indeks vegetasi terbaik dalam hal ini adalah Transformed vegetation Indeks (TVI). Uji Validasi digunakan untuk mengetahui besar penyimpangan yang terjadi antara model penduga terbaik dengan hasil pengukuran. Model penduga terbaik untuk karbon lapangan adalah TVI sedangkan untuk pengukuran dengan TLS adalah TVI.

Tabel 5. Nilai Statistik dari Pengukuran Lapangan dengan TVI

N	RMSE	Bias	T-Hitung	T-Tabel 0,05
9	24,42 (16,72)%	0,56	0,86	2,306

Hasil perhitungan pada Tabel 5. dapat dilihat bahwa nilai RMSE 24,42 atau 16,72% yang artinya nilai tersebut cukup bagus. Perhitungan nilai Bias didapatkan 0,56 yang artinya cukup baik dikarenakan mendekati nilai 0. Hasil perhitungan uji T didapatkan T-Hitung < T-Tabel yang artinya H0 diterima atau tidak terjadi perbedaan yang signifikan antara hasil permodelan TVI dengan pengukuran lapangan.

Tabel 6. Nilai Statistik dari Pengukuran TLS dengan TVI

N	RMSE	Bias	T-Hitung	T-Tabel 0,05
9	26,93 (18,42)%	0,35	0,48	2,306

Hasil perhitungan pada Tabel 6. dapat dilihat bahwa model pendugaan cadangan karbon dengan menggunakan Terrestrial Laser Scanner dengan Indeks Vegetasi Transformed Vegetation Index (TVI) didapatkan Nilai RMSE 26,93 atau 18,42% yang artinya nilai tersebut cukup baik dikarenakan masih 18,42% dari rata-rata nilai stok karbon, sedangkan nilai Biasnya adalah 0,469 yang artinya cukup baik dikarenakan mendekati nilai 0.

Hasil perhitungan uji T menunjukkan bahwa nilai T-Hitung lebih rendah daripada nilai T-Tabel pada taraf signifikansi 0,05. Hal ini mengindikasikan bahwa H0 dapat diterima, yang berarti tidak terdapat perbedaan signifikan antara model pendugaan karbon indeks vegetasi TVI dengan hasil pengukuran karbon menggunakan TLS. Bazezew (2018) dalam penelitiannya mengevaluasi model hasil pengukuran TLS dan pengukuran lapangan di Anyer, Malaysia didapatkan nilai bias 0,52.

4. Kesimpulan

Hasil perhitungan karbon pada tegakan hutan menggunakan TLS didapatkan rata-rata karbon sebesar 151,35 Ton/Ha sedangkan menggunakan pengukuran lapangan sebesar 149,81 Ton/Ha.

Hubungan antara Indeks vegetasi dengan pengukuran lapangan diperoleh korelasi terbaik TVI dengan $r = 0,784$ dan koefisien determinasi $R^2 = 0,524$. Hubungan antara indeks vegetasi dengan pengukuran TLS diperoleh nilai korelasi terbaik TVI dengan $r = 0,759$ dan koefisien determinasi $R^2 = 0,577$.

5. Acknowledgment

Ucapan terima kasih ini ditujukan kepada TIM Universitas Mulawarman Kiswanto, Ph.D, A'ang Gunaifi, M. Lutfi Hamdani, Shukiy R. Sigalingging dan TIM Univeristy Of Twente Dr. Yousif Ali Hussin, Welday Berhe Tesfay, Abul Hashem atas bantuan dalam penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

- Anonim. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, pp.10-1.
- Anonim. 2020. Update Komitmen Target Penurunan Emisi Indonesia. https://ppid.menlhk.go.id/siaran_pers/browse/2324 1 Juni 2020.
- Askar, Nuthammachot, N., Phairuang, W., Wicaksono, P. dan Sayektiningsih, T., 2018. Estimating Aboveground Biomass on Private Forest Using Sentinel-2 Imagery. *Journal of Sensors*, 2018.
- Bazezew, M. N., Hussin, Y. A., & Kloosterman, E. H. 2018. Integrating Airborne LiDAR and Terrestrial Laser Scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 638–652.
- Chave, J., Réjou - Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C. dan Henry, M., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), pp.3177-3190.
- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O. and Quintano, C., 2016. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 50, pp.170-175.
- Frananda, H., Hartono, H. dan Jatmiko, R.H. 2015. Komparasi Indeks Vegetasi Untuk Estimasi Stok Karbon Hutan Mangrove Kawasan Segoro Anak Pada Kawasan Taman Nasional Alas Purwo Banyuwangi, Jawa Timur. *Majalah Ilmiah Globe*, 17(2), pp.113-123.
- Ginting, T. dan Prayogo, C. 2018. 'Estimation of Carbon Stock of Teak Forest (*Tectona grandis* Linn . F) Using Various Allometric Equations on Various Age Classes of Teak', *Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 5(2), pp. 1019–1026.
- Hairiah K dan S Rahayu. 2007. Pengukuran 'karbon tersimpan' di berbagai macam penggunaan lahan. World Agroforestry Centre. ICRAF, SEA Regional Office, University of Brawijaya, Indonesia
- Karmila, D., Jauhari, A., & Kanti, R. 2020. Estimasi Nilai Cadangan Karbon Menggunakan Analisis NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) di KHDTK Universitas Lambung Mangkurat. *Jurnal Sylva Scientiae*, 3(3), 451-459
- Karyati, S.A., dan Syafrudin, M. 2016. Fluktuasi Iklim Mikro di Hutan Pendidikan Fakultas Kehutanan Universitas Mulawarman. *Agrifor*, 15(1), pp.83-92
- Krisnawati, H., Imanuddin, R., Adinugroho, W.C. dan Hutabarat, S., 2015. Metode standar untuk pendugaan emisi gas rumah kaca dari sektor kehutanan di Indonesia. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Bogor.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F. dan Holopainen, M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, pp.63-77
- Majid, R.A. dan Ghozali, I., 2015. Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi pengungkapan emisi gas rumah kaca pada perusahaan di indonesia (Doctoral dissertation, Fakultas Ekonomika dan Bisnis).
- Nabila, N., Jaya, G. dan Saleh, F., 2019. Pemanfaatan Citra Sentinel 2-A Untuk Pengembangan Model Estimasi Stok Karbon Pada Tegakan Vegetasi Kota Kendari. In *Seminar Nasional Teknologi Terapan Berbasis Kearifan Lokal (Vol. 2, No. 1)*.
- Pitkänen, T. P., Raunonen, P., Liang, X., Lehtomäki, M., & Kangas, A. 2021. Improving TLS-based stem volume estimates by field measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105882.
- Rakhmawati, M. 2012. Pemanfaatan Citra Landsat Untuk Estimasi Biomassa Atas Permukaan Dari Berbagai Penutupan Lahan dengan Pendekatan Indeks Vegetasi. Skripsi Program Studi Manajemen Sumberdaya Lahan Fakultas Pertanian. IPB Bogor. 81 Hal.
- Ramadhani, I., 2019. Aplikasi Penginderaan Jauh Dengan Citra Satelit Aqua Modis Untuk Estimasi Upwelling Berdasarkan Variabelitas Suhu Permukaan Laut Dan Klorofil-A (Studi Kasus: Selat Bali) (Doctoral dissertation, ITN MALANG).

- Richter, R. and Schläpfer, D., 2005. Atmospheric/topographic correction for satellite imagery. DLR report DLR-IB, 438, pp.565-01.
- Ricke, A., Jaya, G., & Saleh, F. 2019. Perbandingan Model Transformasi Indeks Vegetasi Untuk Pemetaan Stok Karbon Di Kawasan PERKOTAAN. In Seminar Nasional Teknologi Terapan Berbasis Kearifan Lokal (Vol. 2, No. 1).
- Sobieraj, A., & Mróz, M. 2004. Comparison of several vegetation indices calculated on the basis of a seasonal SPOT XS time series, and their suitability for land cover and agricultural crop identification. Technical Sciences / University of Warmia and Mazury in Olsztyn, nr 7(7), 39–66.
- Tesfay, W. B. 2019. Integrating Terrestrial Laser Scanner and Unmanned Aerial Vehicle Data To Estimate Above Ground Biomass / Carbon in Kebun Raya Unmul Samarinda Tropical Rain Forest, East Kalimantan, Indonesia. M.Sc Program Natural Resource Management. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, Netherlands. 84h.
- Tesfaye, A. A., & Awoke, B. G. 2021. Evaluation of the saturation property of vegetation indices derived from sentinel-2 in mixed crop-forest ecosystem. Spatial Information Research, 29(1), 109-121.
- Tosiani, A. 2015. Buku Kegiatan Serapan dan Emisi Karbon. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Jakarta.
- Vidyan, Y., Abidin, H.C., Gumilar, I. dan Haerani, N. 2013. Pemanfaatan metode TLS (Terrestrial Laser Scanning) untuk pemantauan deformasi gunung api. Studi kasus: kerucut sinder Gunung Galunggung, Jawa Barat. Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi, 4(1), pp.49-69