PEMETAAN BIOMASSA TEGAKAN HUTAN HUJAN TROPIS DI BUKIT MANDIANGIN MENGGUNAKAN CITRA SENTINEL-2 MSI

Tropical Rain Forest Stand Biomass Mapping at Mandiangin Hill Using Sentinel-2 MSI Imagery

Mufidah Asy'ari, Syam'ani, Trisnu Satriadi
Fakultas Kehutanan Universitas Lambung Mangkurat

ABSTRACT. *The preservation of standing biomass is one of the most vital elements for environmental sustainability and the sustainability of the forest itself. One of the actions that can be taken in an effort to maintain the sustainability of forest stand biomass is to map the distribution of biomass, and monitor changes or dynamics of stand biomass from time to time in a sustainable manner. This study aims to build a model based on remote sensing imagery to estimate the total biomass of tropical rainforest stands in Mandiangin Hill, South Kalimantan. The models developed in this study are based on vegetation indices extracted from Sentinel-2 MSI Imagery. A total of ten vegetation indices were tested in this study. For the construction process and validation of stand biomass estimation models, biomass information was measured directly in the field using a number of measuring plots. Stand biomass estimation models were made by correlating stand biomass information from the field with vegetation indices from Sentinel-2 MSI Imagery. The results showed that the most accurate model for estimating the biomass of tropical rainforest stands was 9.5806.exp (0.1454.PSSRa). Where PSSRa is Pigment Specific Simple Ratio. This model has a correlation coefficient (R^2) of 0.876, a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 16.8%, and a Root Mean Square Error (RMSE) of 32.6. The estimation results show that the total biomass of the Bukit Mandiangin tropical rainforest stands is between 11.7 to 998.5 Mg/ha, with an average biomass of 135.8 Mg/ha. Furthermore, the estimation of stand biomass in this study is limited to woody vegetation with a DBH of 10 cm and above. The PSSRa model with various improvements can be used to accurately estimate stand biomass*

Keywords: *Biomass; forest stand, Mandiangin, Sentinel-2, allometry*

ABSTRAK. Kelestarian biomassa tegakan merupakan salah satu elemen yang sangat vital bagi kelestarian lingkungan dan kelestarian hutan itu sendiri. Salah satu tindakan yang dapat diambil dalam usaha menjaga kelestarian biomassa tegakan hutan adalah dengan memetakan distribusi biomassa, serta memantau perubahan atau dinamika biomassa tegakan dari waktu ke waktu secara berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk membangun model berbasis citra penginderaan jauh untuk mengestimasi biomassa total tegakan hutan hujan tropis di Bukit Mandiangin, Kalimantan Selatan. Model yang dikembangkan di dalam penelitian ini berbasis pada indeks-indeks vegetasi yang diekstrak dari Citra Sentinel-2 MSI. Total ada sepuluh indeks vegetasi yang diuji di dalam penelitian ini. Proses konstruksi dan validasi model-model estimasi biomassa tegakan, informasi biomassa diukur secara langsung di lapangan dengan menggunakan sejumlah plot ukur. Model-model estimasi biomassa tegakan dibuat dengan cara mengkorelasikan antara informasi biomassa tegakan dari lapangan dengan indeks-indeks vegetasi dari Citra Sentinel-2 MSI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model yang paling akurat untuk mengestimasi biomassa tegakan hutan hujan tropis adalah 9,5806.exp (0,1454.PSSRa). PSSRa adalah Pigment Specific Simple Ratio. Model ini memiliki koefisien korelasi (R^2) 0,876, Mean Absolute Percentage Error (MAPE) 16,8%, dan Root Mean Square Error (RMSE) 32,6. Hasil estimasi menunjukkan bahwa biomassa total tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin berkisar antara 11,7 hingga 998,5 Mg/ha, dengan rata-rata biomassa 135,8 Mg/ha. Lebih jauh, estimasi biomassa tegakan di dalam riset ini terbatas pada vegetasi berkayu dengan DBH 10 cm ke atas. Model PSSRa dengan berbagai penyempurnaan dapat digunakan mengestimasi biomassa tegakan dengan relatif tepat.

Kata kunci: *Biomassa; tegakan hutan; Mandiangin, Sentinel-2; allometri*

Penulis untuk korespondensi, surel: mufie.ikhsan@ulm.ac.id

PENDAHULUAN

Bukit Mandiangin yang terletak di Kabupaten Banjar, Provinsi Kalimantan Selatan, dapat dikatakan sebagai miniatur tegakan hutan hujan tropis. Secara kawasan, Bukit Mandiangin berada di dalam Kawasan Hutan Konservasi Riam Kanan. Sementara secara pengelolaan, sebagian besar wilayah Bukit Mandiangin berada di bawah pengelolaan Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Hutan Pendidikan dan Pelatihan Universitas Lambung Mangkurat (ULM). Sebagai sebuah kawasan hutan konservasi, Bukit Mandiangin khususnya dan KHDTK Hutan Pendidikan dan Pelatihan ULM umumnya, memiliki permasalahan ancaman kejadian kebakaran hutan dan lahan setiap musim kemarau. Bencana kebakaran hutan dan lahan ini sangat mengancam kelestarian biomassa tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin dan KHDTK ULM, serta dapat menimbulkan dampak emisi karbon yang cukup serius ke atmosfir.

Kelestarian biomassa tegakan merupakan salah satu elemen yang sangat vital bagi kelestarian lingkungan dan kelestarian hutan itu sendiri. Berkurangnya cadangan biomassa tegakan, baik akibat penebangan maupun kebakaran hutan dan lahan, tidak hanya berdampak pada hutan itu sendiri, tetapi juga bagi lingkungan sekitarnya. Sehingga diperlukan tindakan-tindakan yang nyata untuk dapat menjaga kelestarian biomassa tegakan hutan. Salah satu tindakan yang dapat diambil dalam usaha menjaga kelestarian biomassa tegakan hutan adalah dengan memetakan distribusi biomassa, serta memantau perubahan atau dinamika biomassa tegakan dari waktu ke waktu secara berkelanjutan. Kita dapat mengestimasi parameter biofisik tertentu pada sebatang pohon secara langsung di lapangan dengan menggunakan persamaan alometri. Persamaan alometeri pada dasarnya adalah sebuah model statistik regresi, yang menggambarkan korelasi antara satu atau beberapa dimensi pohon, dengan dimensi-dimensi lainnya. Misalnya korelasi antara diameter batang pohon setinggi dada dengan biomassa pohon.

Tentu saja, pendugaan biomassa per batang pohon tidak cukup efisien jika digunakan untuk memantau biomassa tegakan hutan pada wilayah yang luas. Dalam hal ini, teknologi citra penginderaan jauh dapat membantu mengestimasi parameter biofisik tegakan hutan pada skala wilayah yang luas, dan dengan hasil yang dapat dipertanggung jawabkan. Misalnya estimasi volume, jumlah pohon, *persentasi* kerapatan tajuk pohon, termasuk biomassa tegakan dan cadangan karbon tegakan hutan. Saat ini, perkembangan teknologi penginderaan jauh sudah sangat luar biasa. Bahkan saat ini sudah tersedia secara gratis citra satelit resolusi spasial yang cukup tinggi, dengan intensitas perekaman (reolusi temporal) yang cukup tinggi.

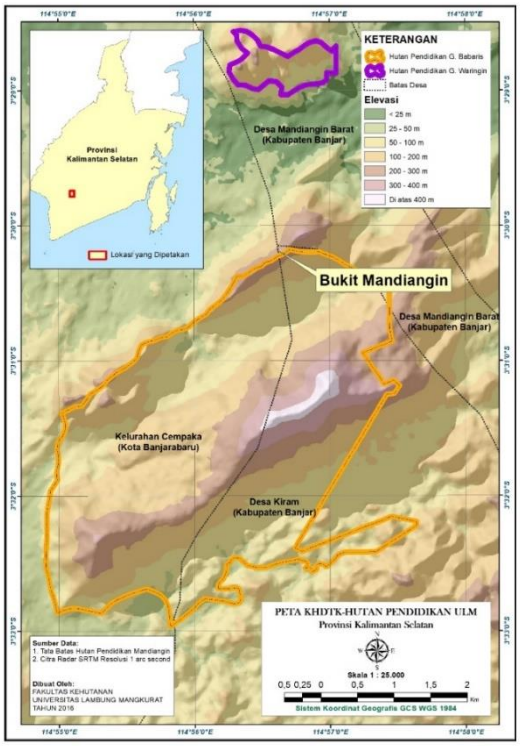
Salah satu contoh produk teknologi penginderaan jauh yang sedang populer saat ini adalah Citra Sentinel-2 *Multispectral Instrument* (MSI) milik *European Space Agency* (ESA). Citra Sentinel-2 memiliki resolusi spasial 10 meter, dan intensitas perekaman setiap 5 hari pada lokasi yang sama. Sehingga secara teoritis kita dapat memantau suatu wilayah setiap 5 hari sekali. Citra Sentinel-2 cukup mumpuni untuk dimanfaatkan dalam pendugaan parameter biofisik tegakan hutan. Baik itu volume tegakan atau pun biomassa tegakan hutan. Berbagai penelitian sudah dilakukan untuk mengestimasi parameter biofisik tegakan hutan dengan menggunakan Citra Sentinel-2, misalnya Majasalmi and Rautiainen (2016), Castillo *et al*. (2017), Chrysafis *et al*. (2017), Godinho *et al*. (2017), Hawryło and Wężyk (2018), Mura *et al*. (2018), Persson *et al*. (2018), Astola *et al*. (2019), Brown *et al*. (2019), Čabaravdić and Balić (2019), Chrysafis *et al*. (2019), Gara *et al*. (2019), Mauya *et al*. (2019), dan Morin *et al*. (2019).

Penelitian ini bertujuan untuk membangun model berbasis citra penginderaan jauh untuk mengestimasi biomassa tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin. Sekaligus menguji akurasi model berbasis citra penginderaan jauh untuk mengestimasi biomassa total tegakan hutan hujan tropis. Pada akhirnya nanti, diharapkan akan terbentuk peta distribusi geospasial biomassa tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin, dan diketahuinya total biomassa tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Bukit Mandiangin, yang merupakan bagian dari Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus

(KHDTK) Hutan Pendidikan dan Pelatihan Universitas Lambung Mangkurat. Estimasi biomassa tegakan hutan hujan tropis akan dilakukan pada keseluruhan Bukit Mandiangin, di wilayah KHDTK Universitas Lambung Mangkurat. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Posisi pembentukan lorong pengatus

Sepuluh indeks vegetasi diimplementasikan di dalam penelitian ini. Seluruh indeks vegetasi ditransformasikan dari Citra Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI), yang disediakan secara gratis oleh European Space Agency (ESA) atau Badan Antariksa Uni Eropa. Citra Sentinel-2 yang digunakan adalah Sentinel-2B tile 50MKB perekaman tanggal 30 Mei 2021 level 2A (*surface reflectance*). Adapun indeks-indeks vegetasi yang dipilih di dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Proses pengolahan dan transformasi Citra Sentinel-2 menjadi indeks-indeks vegetasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak terbuka (*open source*) ESA SNAP (*Sentinel Application Platform*) yang disediakan oleh Badan Antariksa Eropa, yang dapat diunduh secara gratis di laman https://step.esa.int/main/download/snap-download.

Proses konstruksi dan validasi model-model estimasi biomassa tegakan, informasi biomassa diukur secara langsung di lapangan dengan menggunakan sejumlah plot ukur. Total ada 45 plot ukur yang diambil di lapangan, dengan ukuran plot 10 meter x 10 meter, mengikuti resolusi spasial Citra Sentine-2 yang digunakan, yaitu 10 meter. Dari 45 plot ini, 30 plot digunakan untuk membangun model-model estimasi biomassa tegakan, sementara sisanya yang 15 plot digunakan untuk validasi atau uji akurasi model (plot *testing area*). Pada masing-masing plot ukur, masing-masing diukur diameter setinggi dada (DBH) pohon/tanaman berkayu yang memiliki diameter 10 cm ke atas. Selanjutnya, biomassa individu total per pohon dalam satuan kilogram (kg) dihitung dengan menggunakan persamaan alometri pada rumus 1 (Djomo and Chimi, 2017).

$$Biomassa\ pohon\ (kg) = exp\left(-1{,}475 + 2{,}153 ln(DBH)\right) \quad (1)$$

Langkah berikutnya, seluruh biomassa individu pohon di dalam masing-masing plot dijumlahkan, untuk mendapatkan informasi biomassa per plot. Informasi biomassa per plot kemudian diekstrapolasi menjadi biomassa dalam satuan Mg/ha (Megagram per hektare), dengan menggunakan rumus 2.

$$Biomassa\ (Mg/ha) = Biomassa(kg/plot) x \frac{10.000\ m^2/100\ m^2}{1.000\ kg} \quad (2)$$

Tabel 1. Daftar indeks vegetasi

Nomor	Indeks Vegetasi	Formula	Referensi
1	*Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Rouse et al. (1973)
2	*Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)*	$SAVI = \frac{(NIR - Red)(1 + L)}{NIR + Red + L}$	Huete (1988)
3	*Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)*	$MSAVI = NIR + 0{,}5 - \sqrt{(NIR + 0{,}5)^2 - 2(NIR - Red)}$	Qi et al. (1994)
4	*Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)*	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Gitelson and Merzlyak (1998)
5	*Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI)*	$IPVI = \frac{NIR}{NIR + Red}$	Crippen (1990)
6	*Transformed Normalized Difference Vegetation Index (TNDVI)*	$TNDVI = \sqrt{\frac{NIR - Red}{NIR + Red} + 0{,}5}$	Senseman et. al. (1996)
7	*Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)*	$ARVI = \frac{NIR - Red + \gamma(Blue - Red)}{NIR + Red - \gamma(Blue - Red)}$	Kaufman and Tanre (1992)
8	*Normalized Difference Index 45 (NDI45)*	$NDI45 = \frac{RE1 - Red}{RE1 + Red}$	Delegido et al. (2011)
9	*Inverted Red-Edge Chlorophyll Index (IRECI)*	$IRECI = \frac{NIR - Red}{\frac{RE1}{RE2}}$	Frampton et al. (2013)
10	*Pigment Specific Simple Ratio (PSSRa)*	$PSSRa = \frac{NIR}{Red}$	Blackburn (1998)

Keterangan:

Blue : *Blue band* atau saluran 2 Citra Sentinel-2
Green : *Green band* atau saluran 3 Citra Sentinel-2
Red : *Red band* atau saluran 4 Citra Sentinel-2
RE1 : *Red Edge 1 band* atau Saluran 5 Citra Sentinel-2
RE2 : *Red Edge 2 band* atau saluran 6 Citra Sentinel-2
NIR : *Near Infrared band* atau saluran inframerah dekat atau saluran 8 Citra Sentinel-2
L : *Canopy background adjustment factor* yang bernilai 0,5
γ : *Aerosol factor*, di dalam penelitian ini digunakan nilai 1

Model-model estimasi biomassa tegakan dibuat dengan cara mengkorelasikan antara informasi biomassa tegakan dari lapangan dengan indeks-indeks

vegetasi dari Citra Sentinel-2 MSI. Di dalam uji korelasi atau pembangunan model estimasi biomassa tegakan ini akan dilibatkan sejumlah model persamaan regresi, yaitu *linier, logaritmik, eksponensial, polinomial*, dan *power.* Hasil estimasi biomassa tegakan dari model-model dikembangkan, selanjutnya dibandingkan dengan informasi biomassa tegakan faktual dari masing-masing plot *testing area*. Metode perbandingan atau uji akurasi yang digunakan adalah *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Yang diformulasikan masing-masing pada rumus 3 dan rumus 4.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{|y_i - x_i|}{x_i}}{n} x100\% \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Keterangan:

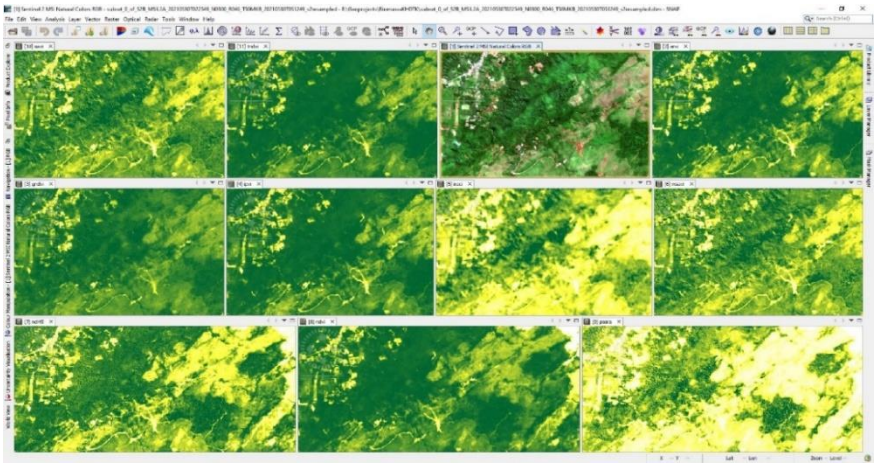
x_i : Data biomassa tegakan faktual pada plot yang ke-i dari *testing area*
y_i : Data biomassa tegakan pada pixel yang ke-i hasil estimasi dari model yang dikembangkan
n : Jumlah plot *testing area* (15 plot)

Tahap akhir model indeks vegetasi yang paling akurat akan digunakan untuk memetakan dan menghitung biomassa tegakan hujan tropis di Bukit Mandiangin. Model yang paling akurat adalah model yang menghasilkan nilai MAPE dan RMSE yang paling kecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Permasalahan utama yang dihadapi ketika kita memanfaatkan indeks-indeks vegetasi untuk memetakan parameter-parameter biofisik vegetasi, seperti biomassa, kerapatan tajuk, volume, tinggi pohon, dan sebagainya, adalah keberadaan gangguan atmosferik dan efek topografik. Gangguan atmosferik dapat berupa kehadiran awan, bayangan awan, kabut, uap air, debu dan sebagainya. Sementara gangguang topografik dapat berupa bayangan bukit. Idealnya, waktu survey pengambilan data biofisik vegetasi harus koheren dengan waktu perekaman satelit. Akan tetapi, dikarenakan gangguang atmosferik yang cukup masif di sekitar lokasi penelitian, utamanya adalah kehadiran awan, membuat kami sulit untuk menemukan waktu perekaman Citra Sentinel-2 yang bersesuaian dengan pelaksanaan kegiatan pengambilan data di lapangan. Selain itu, lokasi penelitian ini terletak di perbukitan yang cukup rentan tertutup bayangan ketika posisi matahari berada pada titik tertentu. Wilayah-wilayah yang terkena bayangan bukit berpotensi untuk menurunkan akurasi model estimasi biomassa berbasis indeks vegetasi. Meskipun pada kenyataannya, Citra Sentinel-2 MSI yang digunakan di dalam penelitian ini sudah level 2A, yang berarti sudah terkoreksi secara atmosferik dan topografik. Akan tetapi, gangguan topografik masih dapat terlihat secara visual di lokasi penelitian.

Setiap indeks vegetasi memiliki karakteristik statistik sendiri-sendiri, terutama dalam korelasinya dengan kerapatan atau biomassa vegetasi. Hal ini berhubungan erat dengan saluran-saluran spektral yang digunakan oleh masing-masing indeks vegetasi, dan tentu saja formula-formula matematika yang digunakan. Sebagian besar metode transformasi indeks vegetasi menggunakan pendekatan formula non-linier. Sehingga korelasi antara citra hasil transformasi indeks vegetasi dengan biomassa vegetasi pada umumnya non-linier. Selengkapnya, gambaran visual hasil transformasi seluruh indeks vegetasi yang diimplementasikan di dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2 dilihat perbedaan kenampakan sebaran warna antar indeks-indeks vegetasi, termasuk perbandingannya dengan citra asli komposit warna sejati (*true colour composite*). Sebagian indeks vegetasi memberikan warna hijau yang luar biasa pada vegetasi rapat, sehingga perbedaannya dengan vegetasi jarang sangat kontras. Sebagian lagi memberikan perbedaan warna yang tidak begitu kontras antara daerah dengan vegetasi rapat denan daerah dengan vegetasi jarang. Tentu saja, hal ini diakibatkan karena perbedaan saluran dan formula matematika yang digunakan, sebagaimana sudah dijelaskan sebelumnya.



Gambar 2. Citra Sentinel-2 MSI dan hasil transformasi indeks-indeks vegetasi

Berdasarkan lima kandidat model regresi, seluruhnya tidak ada yang memberikan korelasi yang sangat kuat untuk model-model linier. Hanya satu model, yaitu yang PSSRa yang memberikan korelasi cukup kuat untuk model linier, yaitu dengan koefisian korelasi sekitar 0,7. Dan memang pada kenyataannya, PSSRa mampu memberikan koefisien korelasi yang tinggi untuk semua model regresi, dimana yang tertinggi adalah pada model *eksponensia*l dan *power*, dengan koefisien korelasi di atas 0,8. Selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3. Model-model lainnya yang juga memberikan koefisien korelasi yang kuat selain PSSRa adalah NDVI untuk model *eksponensial, kuadratik*, dan *power*, dan IPVI dan TNDVI untuk model-model regresi yang sama. Termasuk ARVI yang khusus untuk model eksponensial. Akan tetapi, model-model selain PSSRa ini hanya mampu memberikan koefisien korelasi sekitar 0,7, tidak mencapai korelasi sangat kuat.

Tabel 2. Hasil konstruksi model estimasi biomassa tegakan menggunakan indeks-indeks vegetasi

Indeks Vegetasi	Linier		Eksponensial		Logaritmik		Kuadratik		Power	
	Model	R^2	Model	R^2	Model	R^2	Model	R^2	Model	R^2
SAVI	781,25x - 235,88	0,0959	$2,3619e^{7,7312x}$	0,0748	427,98ln(x) + 451,16	0,101	$-8000,2x^2$ + 9376,2x - 2529,9	0,1235	$2147,5x^{4,257}$	0,0792
NDVI	2164,8x - 1746,6	0,4832	$1E-05e^{18,215x}$	0,7671	1787,9ln(x) + 389,91	0,4613	$35469x^2$ - 57973x + 23638	0,7889	$863,82x^{15,203}$	0,7453
MSAVI	610,81x - 114,29	0,0781	$7,5203e^{6,1379x}$	0,1801	306,52ln(x) + 405,34	0,0831	$-5427x^2$ + 5944,1x - 1411,3	0,0993	$1412,8x^{3,0995}$	0,194
IPVI	4334,6x - 3916,1	0,4835	$2E-13e^{36,467x}$	0,7817	3960,3ln(x) + 404,8	0,4734	$142179x^2$ - 258383x + 117340	0,7897	$969,54x^{33,48}$	0,7728
TNDVI	4989,8x - 5702,3	0,4763	$4E-20e^{42,123x}$	0,7754	5746,4ln(x) - 765,17	0,4694	$190807x^2$ - 437841x + 251122	0,7833	$0,0484x^{48,672}$	0,7693
GNDVI	2168,5x - 1498,6	0,4036	$0,001e^{15,395x}$	0,4647	1611,2ln(x) + 593,96	0,3928	$11557x^2$ - 15302x + 5088,4	0,4427	$2776,2x^{11,486}$	0,456
ARVI	1196,2x - 886,07	0,4111	$0,0138e^{10,387x}$	0,708	941,71ln(x) + 290,75	0,3839	$9522,1x^2$ - 14458x + 5470,3	0,5875	$385,15x^{8,3125}$	0,6832
NDI45	928,26x - 386,14	0,3883	$1,1779e^{7,8908x}$	0,641	476,01ln(x) + 419,45	0,3601	$2796,9x^2$ - 2139,6x + 429,82	0,4268	$1177x^{4,164}$	0,6294
IRECI	382,47x - 212,04	0,4424	$8,0716e^{2,8186x}$	0,5488	387,98ln(x) + 176,92	0,4524	$-224,54x^2$ + 850,41x - 448,06	0,4519	$141,75x^{2,9325}$	0,5903
PSSRa	19,911x - 192,31	0,7196	$9,5806e^{0,1454x}$	0,876	291,93ln(x) - 663,95	0,6267	$0,7146x^2$ - 4,852x + 6,0045	0,7537	$0,2084x^{2,2642}$	0,8611

Secara umum, hanya model PSSRa yang mampu memberikan koefisien korelasi (R^2) di atas 0,8. Akan tetapi, koefisien korelasi hanya menggambarkan hubungan antara dua variabel, dan tidak serta merta dapat menunjukkan akurasi model secara praktis, sehingga model-model yang dibangun ini perlu diuji akurasinya. Berdasarkan hasil uji akurasi, sebagaimana terlihat pada Tabel 4 dan Tabel 5, terlihat bahwa model-model yang memiliki kesalahan terkecil, atau dengan kata lain akurasi tertinggi, adalah PSSRa untuk model *eksponensial, kuadratik*, dan *power*. Di antara semua model, memang hanya PSSRa yang mampu memberikan kesalahan absolut (MAPE) di bawah 20%, yang berarti mampu memberikan akurasi di atas 80% dalam estimasi biomassa. Dan hal ini diberikan oleh PSSRa pada model eksponensial. Sehingga sudah terbukti berdasarkan fakta koefisien korelasi dan kesalahan (MAPE), bahwa PSSRa dengan model regresi *eksponensial* merupakan model yang paling akurat di dalam mengestimasi biomassa total tegakan hutan hujan tropis di Bukit Mandiangin.

Sebenarnya, nilai RMSE PSSRa yang paling rendah dimiliki oleh model *power*, akan tetapi karena kesalahannya di atas 20%, dan selisih nilai RMSE degan model *eksponensial* juga tidak terlalu jauh, maka PSSRa dengan model *eksponensial* sejatinya tetap yang terbaik berdasarkan hasil studi ini. Sehingga model ini lah yang kemudian dijadikan sebagai formula di dalam pemetaan biomassa total tegakan hutan hujan tropis di Bukit Mandiangin. Tentu saja, semua model yang dihasilkan di dalam riset ini sudah langsung memberikan informasi biomassa tegakan pada satuan Megagram atau ton per hektar (Mg/ha). Lebih jauh, model ini dapat dijadikan sebagai formula untuk estimasi cadangan karbon serta kalkulasi emisi karbon dari deforestasi tegakan hutan hujan tropis.

Tabel 3. Mean Absolute Percentage Error

Indeks Vegetasi	Linier	Eksponensial	Logaritmik	Kuadratik	Power
SAVI	72.09%	53.17%	70.83%	61.67%	52.26%
NDVI	54.62%	16.85%	57.05%	38.14%	32.51%
MSAVI	73.34%	53.01%	71.88%	63.91%	51.87%
IPVI	54.60%	57.69%	55.69%	38.27%	31.53%
TNDVI	55.35%	32.71%	56.06%	38.17%	31.86%
GNDVI	54.79%	41.38%	55.90%	48.91%	39.23%
ARVI	61.23%	36.70%	64.67%	27.44%	39.64%
NDI45	63.88%	43.23%	68.67%	51.33%	45.75%
IRECI	53.61%	49.23%	52.16%	51.96%	47.93%
PSSRa	27.60%	16.84%	39.63%	21.46%	22.07%

Hasil penelitian ini sebenarnya cukup mengejutkan, mengingat PSSRa sesungguhnya memiliki metode transformasi yang paling sederhana di antara semua indeks vegetasi yang diterapkan di dalam riset ini. Secara matematis, PSSRa hanya berupa perbandingan antara saluran inframerah dekat dengan saluran merah. Secara umum, saluran inframerah dekat atau NIR di dunia penginderaan jauh memang dikenal akan kemampuanya di dalam mengekstrak informasi biomassa vegetasi. Sebab gelombang inframerah dekat merupakan spektrum yang paling peka terhadap klorofil pada dedaunan vegetasi. Sementara saluran merah terkenal sebagai spektrum yang paling peka terhadap tanah, khususnya tanah murni yang kalau di atas permukaan bumi terlihat berwarna kemerahan. Sehingga secara teoritis, pembagian antara saluran inframerah dekat dengan saluran merah akan mampu menonjolkan fitur-fitur daun vegetasi yang kaya akan kandungan klorofil.

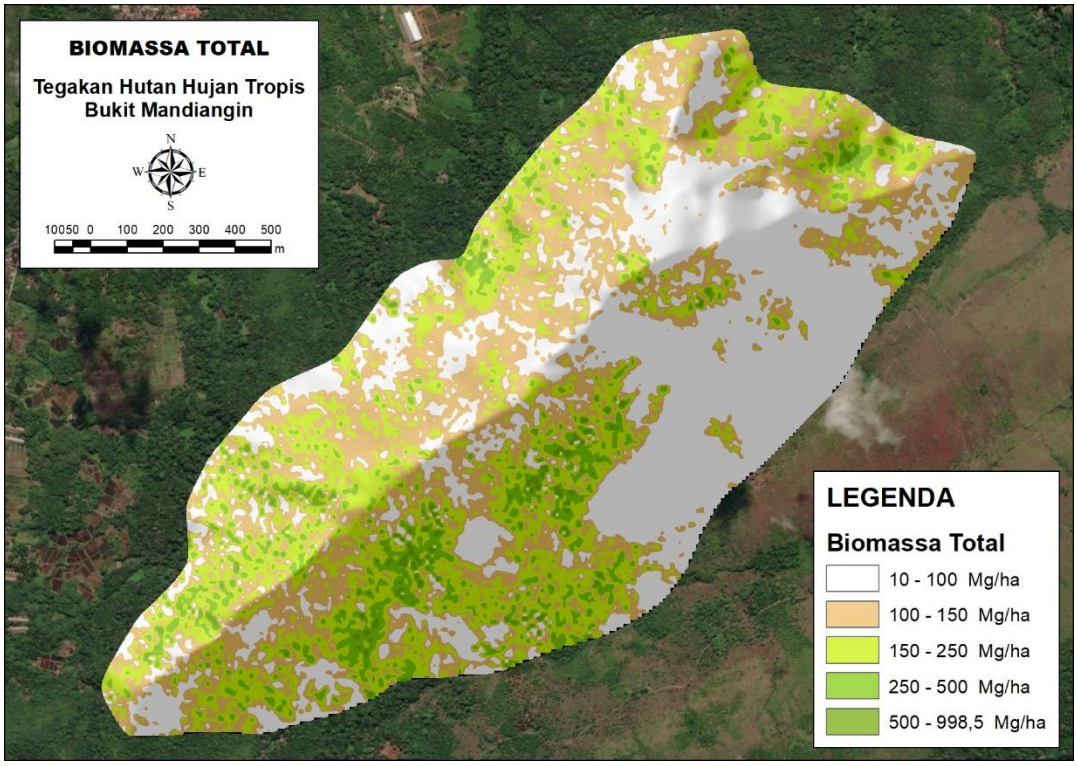
Askar *et al*. (2018) menemukan bahwa kombinasi antara *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Huete *et al*., 2002) dan NDI45 (Delegido *et al*., 2011) dalam persamaan regresi berganda mampu memberikan hasil estimasi biomassa hutan di atas permukaan tanah (*above ground biomass*) yang paling akurat. Tentu saja, kasusnya sedikit berbeda, sebab Askar *et al*. (2018) hanya

mengestimasi biomassa vegetasi di atas permukaan tanah, sementara di dalam penelitian ini, yang diestimasi adalah biomassa total antara biomassa di bawah permukaan tanah (akar) dan biomassa di atas permukaan tanah (batang dan tajuk pohon). Meskipun riset ini juga memiliki keterbatasan, sebab biomassa yang diukur hanya vegetasi berkayu dengan diameter batang setinggi dada 10 centimeter ke atas. Tanaman-tanaman yang kecil dan termasuk tumbuhan bawah tidak diukur biomassanya di dalam penelitian ini. Dengan pertimbangan praktis bahwa dedaunan pohon-pohon kecil dan tumbuhan bawah mungkin terlindung di bawah kanopi pohon-pohon besar, sehingga tidak terdeteksi secara langsung oleh sensor satelit penginderaan jauh. Meskipun tidak tertutup kemungkinan masih dapat terdeteksi, jika kerapatan pohon-pohon besar cukup rendah. Sehingga hal ini menjadi potensi kesalahan sekaligus kelamahan dari riset ini.

Tabel 4. Root Mean Square Error

Indeks Vegetasi	Linier	Eksponensial	Logaritmik	Kuadratik	Power
SAVI	79.33	77.83	78.92	74.91	77.52
NDVI	59.00	47.51	60.64	42.21	39.72
MSAVI	79.13	75.33	78.62	75.11	75.03
IPVI	59.02	66.13	59.75	42.44	38.80
TNDVI	59.50	39.26	59.97	41.94	39.09
GNDVI	65.14	59.33	65.40	63.70	58.44
ARVI	63.66	46.23	66.21	44.19	48.23
NDI45	64.86	52.62	67.87	58.47	53.58
IRECI	83.52	98.92	81.67	81.51	91.85
PSSRa	34.79	32.62	43.96	31.06	30.57

Hasil estimasi dan pemetaan biomassa tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin dengan menggunakan model *eksponensial* PSSRa dapat dilihat secara visual pada Gambar 3. Hasil kalkulasi menunjukkan bahwa biomassa total tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin berkisar antara 11,7 hingga 998,5 Mg/ha, dengan rata-rata biomassa sekitar 135,8 Mg/ha. Biomassa tertinggi berada di lereng-lerang Bukit Mandiangin. Pada kenyataannya di lapangan, memang di lereng-lereng Bukit Mandiangin ini lah banyak terdapat pepohonan besar. Sehingga biomassa tegakannya cukup tinggi. Pada bagian Timur Bukit Mandiangin biomassa tegakannya lebih rendah. Pada Citra Sentinel-2 MSI terlihat bahwa pada bagian Timur ini memang sebagian besarnya bukan merupakan tegakan hutan, melainkan hanya semak belukar, atau bahkan alang-alang.



Gambar 3. Distribusi spasial biomassa tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin

Model-model estimasi biomassa tegakan yang dikembangkan didalam penelitian ini murni berbasis indeks-indeks vegetasi dari Citra Sentinel-2 MSI, dimana indeks-indeks vegetasi pada citra *multispectral* ini secara teoritis tidak dapat membedakan spesies tumbuhan. Sehingga potensi kesalahan estimasi tegakan hutan hujan tropis lainnya yang akan dialami oleh model *eksponensial* PSSRa di dalam riset ini adalah terpetakannya biomassa pohon yang bukan tegakan hutan, misalnya tanaman-tanaman karet milik masyarakat. Faktanya di lapangan, tanaman-tanaman karet ini justru banyak ditemukan di Bukit Mandiangin. Agar estimasi biomassa tegakan dapat lebih efektif dan akurat, sebenarnya sebelum model estimasi dijalankan, terlebih dahulu harus dipisahkan antara tegakan hutan dengan pohon yang bukan hutan. Metodenya bisa secara manual, misalnya digitasi, atau pun dengan klasifikasi digital atau segmentasi citra. Hal ini tidak dilakukan di dalam penelitian ini, sehingga distribusi biomassa tegakan hutan hujan tropis Bukit Mandiangin pada Gambar 3 sejatinya juga memuat informasi biomassa kebun karet milik warga masyarakat.

Meskipun pengambilan sampel di lapangan hanya dilakukan pada pohon-pohon besar dengan diameter 10 centimeter ke atas, akan tetapi hasil pemetaan biomassa tegakan secara otomatis akan mengikutsertakan pepohonan kecil, termasuk semak belukar dan alang-alang. Hal ini karena indeks-indeks vegetasi pada umumnya mendeteksi kandungan klorofil. Sehingga setiap ada daun vegetasi yang sehat, termasuk tumbuhan bawah, semak belukar, dan rerumputan, informasi biomassanya juga akan terekstrak dengan sendirinya. Meskipun nantinya kita dapat membedakannya dari biomassanya yang lebih kecil dengan biomassa tegakan hutan. Berdasakan Gambar 3, kelas biomassa dari 10 hingga 100 Mg/ha boleh jadi sebenarnya bukan tegakan hutan, melainkan hanya semak belukar dan alang-alang. Bahlan jika di sana terdapat tubuh perairan yang di atasnya terdapat vegetasi mengapung sekali pun, biomassanya juga dapat ikut terekstrak secara otomatis.

SIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *Pigment Specific Simple Ratio* (PSSRa) merupakan indeks vegetasi yang paling akurat untuk mengestimasi tegakan

hutan hujan tropis di Bukit Mandiangin. Berdasarkan hasil penelitian ini kami merekomendasikan model PSSRa untuk estimasi biomassa tegakan hutan hujan tropis. Meskipun model-model seperti ini terkadang ketika diuji di lokasi yang berbeda maka akan memberikan akurasi yang berbeda juga. Tentu saja model PSSRa ini tidak hanya terbatas untuk estimasi biomassa, model ini dapat dikembangkan lebih jauh untuk estimasi cadangan karbon bahkan hingga kalkulasi emisi karbon akibat deforestasi nantinya. Kelemahan yang dimiliki model ini, dan indeks-indeks vegetasi multispektral pada umumnya adalah ketidakmampuannya di dalam membedakan spesies vegetasi. Sehingga akan sangat mungkin estimasi biomassa tegakan hutan menjadi bias dengan biomassa tanaman-tanaman lain, misalnya tanaman karet yang berada di dalam hutan. Sehingga, agar pemetaan biomassa tegakan dapat lebih efektif, kedepannya perlu dilakukan segmentasi atau pemisahan antara tanaman karet dengan pepohonan hutan terlebih dahulu, sebelum model PSSRa diimplementasikan. Tentu saja, hal ini hanya dapat dilakukan jika tanaman-tanaman karetnya terpisah atau mengelompok sendiri, dan tidak menyatu dengan tegakan hutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Rektor Universitas Lambung Mangkurat melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (LPPM) memberi kesempatan dan mendanai penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak-pihak yang membantu pelaksanaan penelitian ini Dekan Fakultas Kehutanan ULM, Ketua KHDTK ULM dan mahasiswa S1 dan S2 yang mendampingi saat pengambilan data di lapangan, seperti Ishadi, Rangga dan Agus Hadi. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada pihak Badan Antariksa Eropa (ESA) yang sudah menyediakan Citra Sentinel-2 MSI dan software ESA SNAP secara gratis, dan pihak *Environmental Systems Research Institue* (ESRI) yang sudah menyediakan *Educational License* software *ArcGIS Desktop* yang digunakan di dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Askar, Nuthammachot, N., Phairuang, W., Wicaksono, P., and Sayektiningsih, T. 2018. Estimating Aboveground Biomass on Private Forest Using Sentinel-2 Imagery. *Journal of Sensors*, Article ID 6745629: 11 pages.

Astola, H., Häme, T., Sirro, L., Molinier, M., and Kilpi, J. 2019. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. *Remote Sensing of Environment*, 223: 257-273.

Blackburn, G.A. 1998. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment,* **66**: 273–285.

Brown, L.A., Ogutu, B.O., and Dash, J. 2019. Estimating Forest Leaf Area Index and Canopy Chlorophyll Content with Sentinel-2: An Evaluation of Two Hybrid Retrieval Algorithms. *Remote Sensing*, **11** (15): 1752.

Čabaravdić, A. and Balić, B. 2019. Modelling Stand Variables of Beech Coppice Forest Using Spectral Sentinel-2A Data and the Machine Learning Approach. *South-east European Forestry*, **10** (2): 137-144.

Castillo, J.A.A., Apan, A.A., Maraseni, T.N., and Salmo III, S.G. 2017. Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **134**: 70-85.

Chrysafis, I., Mallinis, G., Siachalou, S., and Patias, P. 2017. Assessing the relationships between growing stock volume and Sentinel-2 imagery in a Mediterranean forest ecosystem. *Remote Sensing Letters*, **8** (6): 508-517.

Chrysafis, I., Mallinis, G., Tsakiri, M., and Patias, P. 2019. Evaluation of single-date and multi-seasonal spatial and spectral information of Sentinel-2 imagery to assess growing stock volume of a Mediterranean forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **77**: 1-14.

Crippen, R.E. 1990. Calculating the vegetation index faster. *RemoteSensing of Environment,* **34**: 71–73.

Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., and Moreno, J. 2011. Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content. *Sensors* **11** (7): 7063-7081.

Djomo, A. N. and Chimi, C. D. 2017. Tree Allometric Equations for Estimation of Above, Below and Total Biomass in a Tropical Moist Forest: Case Study with Application to Remote Sensing. *Forest Ecology and Management*, **381**: 184-193.

Frampton, W.J., Dash, J., Watmough, G., and Milton, E.J. 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **82:** 83-92.

Gara, T.W., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Wang, T., and Heurich, M. 2019. Accurate modelling of canopy traits from seasonal Sentinel-2 imagery based on the vertical distribution of leaf traits. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **157**: 108-123.

Gitelson, A. and Merzlyak, M. 1998. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research*, **22**: 689-692.

Godinho, S., Guiomar, N., and Gil, A. 2017. Estimating tree canopy cover percentage in a mediterranean silvopastoral systems using Sentinel-2A imagery and the stochastic gradient boosting algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, **39** (14): 4640-4662.

Hawryło, P. and Wężyk, P. 2018. Predicting Growing Stock Volume of Scots Pine Stands Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Airborne Image-Derived Point Clouds. *Forests*, **9** (5): 274.

Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* **25**: 295-309.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., and Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, **83:** 195-213.

Kaufman, Y.J. and Tanre, D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **30** (2): 261-270.

Majasalmi, T. and Rautiainen, M. 2016. The potential of Sentinel-2 data for estimating biophysical variables in a boreal forest: a simulation study. *Remote Sensing Letters*, **7** (5): 427-436.

Mauya, E.W., Koskinen, J., Tegel, K., Hämäläinen, J., Kauranne, T., and Käyhkö, N. 2019. Modelling and Predicting the Growing Stock Volume in Small-Scale Plantation Forests of Tanzania Using Multi-Sensor Image Synergy. *Forests*, **10** (3): 279.

Morin, D., Planells, M., Guyon, D., Villard, L., Mermoz, S., Bouvet, A., Thevenon, H., Dejoux, J.F., Toan, T.L., and Dedieu, G. 2019. Estimation and Mapping of Forest Structure Parameters from Open Access Satellite Images: Development of a Generic Method with a Study Case on Coniferous Plantation. *Remote Sensing*, **11** (11): 1275.

Mura, M., Bottalico, M., Giannetti, F., Bertani, R., Giannini, R., Mancini, M., Orlandini, S., Travaglini, D., and Chirici, G. 2018. Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **66**: 126-134.

Persson, M., Lindberg, E., and Reese, H. 2018. Tree Species Classification with Multi-Temporal Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, **10** (11): 1794.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., and Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, **48** (2): 119-126.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I: 309-317.

Senseman, G.M., Bagley, C.F., Tweddale, S.A. 1996. Correlation of rangeland cover measures to satellite-imagery-derived vegetation indices. *Geocarto International* **11**(3): 29-38.