

PENDUGAAN BIOMASSA ATAS PERMUKAAN MENGUNAKAN CITRA LANDSAT 8 OLI DI HUTAN RAKYAT SUB-DAS CIKALUMPANG

Estimation of Aboveground Biomass Using Landsat 8 OLI Imagery in Community Forests of the Cikalumpang Sub-Watershed

Kania Siti Al-Fathi¹, Nining Puspaningsih^{2*} dan Muhdin²

(Diterima 24 Juni 2026 /Disetujui 28 Juni 2026)

ABSTRACT

Forests play a strategic role in the carbon cycle as they are capable of absorbing CO₂ through photosynthesis and storing it in the form of biomass. Biomass estimation can be conducted using remote sensing. This method is highly suitable for monitoring forest biomass due to several advantages, including its easy accessibility, broad coverage area, and ability to reach remote locations. This study aims to estimate the above-ground biomass in the Community Forest of the Cikalumpang Sub-watershed using Landsat 8 OLI imagery. The development of the estimation model utilized a combination of spektral variables from Landsat 8 imagery and field data, specifically vegetation indices such as NDVI, RVI, TVI, SAVI, GRVI, GNDVI, and field diameter. The results of the correlation analysis indicated that the vegetation index values have a high correlation with above-ground biomass. The selection of the above-ground biomass estimation model was based on the highest R² value and the lowest standard deviation (s), aggregate deviation (SA), bias (e), and Root Mean Square Error (RMSE). The selected model is a power model with the RVI variable, formulated as $B = 1.535 + RVI^{0.390} + Diameter^{0.972}$, with an R² value of 77.31%. The average potential of above-ground biomass in the Community Forest of the Cikalumpang Sub-watershed is 92.02 tons/ha.

Keywords: Biomass, community forest, landsat 8, remote sensing, vegetation index

¹ Alumnus Program Sarjana Program Studi Manajemen Hutan, Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

² Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

* Penulis korespondensi: Nining Puspaningsih
e-mail: n_puspaningsih@apps.ipb.ac.id

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan isu lingkungan yang saat ini menjadi sorotan global. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) 2021 menyatakan bahwa penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca (GRK) berasal dari CO₂. Indonesia telah menempati posisi keenam di dunia sebagai penghasil emisi CO₂ terbesar di dunia (World Resources Institute 2016).

Hutan memiliki peran strategis dalam siklus karbon karena mampu menyerap CO₂ melalui fotosintesis dan menyimpannya dalam bentuk biomassa. Estimasi biomassa pohon merupakan metode untuk mengukur faktor emisi tegakan dalam upaya mengendalikan GRK. Jumlah biomassa hutan ditentukan oleh kepadatan, kesuburan tanah, diameter, tinggi dan gravitasi spesifik kayu (Heriyanto *et al.* 2020). Oleh karena itu, pengukuran biomassa menjadi aspek penting dalam mendukung perencanaan pengelolaan hutan berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim.

Keberadaan hutan rakyat memberikan kontribusi signifikan dalam upaya pengurangan GRK, selain itu hutan rakyat juga berfungsi menyerap dan menyimpan karbon dalam bentuk biomassa (Zulkarnaen 2020). DAS Cidanau memiliki luas 22.620 ha yang berperan dalam mendukung pembangunan di Provinsi Banten. Hutan rakyat di Sub-DAS Cikalumpang yang berada dalam wilayah DAS Cidanau merupakan lokasi berlangsungnya kegiatan *Payment for Environmental Services* (PES) untuk menjaga keberlanjutan jasa lingkungan, khususnya penyediaan air baku.

Sub-DAS Cikalumpang memiliki hutan rakyat seluas 1.320,49 ha yang berkontribusi terhadap pengendalian erosi, ketersediaan air, dan mitigasi perubahan iklim melalui kemampuan vegetasinya dalam menyimpan karbon. Namun demikian, implementasi PES di wilayah tersebut masih menghadapi berbagai tantangan, salah satunya adalah belum optimalnya integrasi informasi khususnya data biomassa dan cadangan karbon. Oleh karena itu, informasi biomassa atas permukaan tegakan menjadi parameter penting dalam menilai kondisi dan fungsi ekologis hutan rakyat sebagai dasar penguatan skema PES di Sub-DAS Cikalumpang.

Metode pengukuran kandungan biomassa bisa dilakukan dengan pengukuran langsung (*destructive sampling*) dan pengukuran tidak langsung (*non-destructive*). Penginderaan jauh merupakan teknologi untuk mendapatkan informasi tentang suatu objek atau fenomena alam di permukaan bumi tanpa adanya kontak langsung dengan objek tersebut. Teknologi ini menggunakan pengukuran pantulan (*reflection*) gelombang elektromagnetik dari objek tersebut (Lillesand dan Kiefer 2004). Metode penginderaan jauh ini merupakan pendekatan *non-destructive* yang memiliki beberapa keunggulan di antaranya dapat diakses dengan mudah, daerah cakupannya luas dan mampu menjangkau daerah terpencil (Fassnacht *et al.* 2023). Citra satelit merupakan salah satu data penginderaan jauh. Landsat 8 merupakan salah satu jenis citra satelit yang menyediakan data pada spektral pankromatik, infra merah, termal, dan cirrus dalam resolusi spasial sedang. Data ini dapat digunakan untuk menganalisis vegetasi seperti pendugaan biomassa (Hutan *Ketapang* Indonesia 2021).

Biomassa memiliki peranan krusial dalam siklus karbon dan pengendalian jasa lingkungan, sehingga erat kaitannya dengan isu perubahan iklim. Oleh karena itu, pendugaan biomassa atas permukaan hutan rakyat berbasis penginderaan jauh menjadi pendekatan strategis untuk mendukung pengelolaan dan perhitungan nilai jasa lingkungan di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan membangun pemodelan spasial untuk estimasi biomassa atas permukaan menggunakan citra landsat 8 OLI dan membuat peta sebaran biomassa di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan bulan Februari sampai dengan April 2026. Pengambilan data lapangan dilaksanakan pada Februari 2026, yang dilaksanakan di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang. Sub-DAS Cikalumpang merupakan Sub-DAS terluas di DAS Cidanau sebesar 7.200 ha atau setara dengan

31,83% dari total luas DAS Cidanau. Sub-DAS Cikalumpang memiliki area hutan rakyat seluas 1.320,49 ha. Sub-DAS ini secara administratif berada di Kecamatan Padarincang, Pabuaran, dan Mandalawangi Kabupaten Serang, Provinsi Banten. Secara geografis, Sub-DAS Cikalumpang berada di koordinat 6°13'36"–6°16'39" LS dan 105°56'15"–105°59'18" BT.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah kompas, *phi band*, pita ukur, meteran, *haga hypsometer*, *Global Positioning System* (GPS), tali tambang, tali rafia, patok bambu, golok, pisau, kamera, timbangan gantung, plastik, *oven*, alat tulis, dan *tallysheet*. Sedangkan bahan yang digunakan adalah citra landsat 8, diameter lapangan dan biomassa. Pengolahan data dilakukan menggunakan *software Microsoft Excel* 2016, *ArcGIS* 10.8, dan *Minitab* 18.

Pengolahan dan Analisis Data

Prosedur analisis data penelitian ini terdiri dari beberapa proses yaitu pra pengolahan citra, pembuatan indeks vegetasi, penentuan plot contoh, pengambilan data lapangan, pengolahan data lapangan, pemilihan peubah bebas model, analisis data dengan perhitungan biomassa, pemilihan model regresi terbaik, dan pemetaan sebaran potensi biomassa atas permukaan.

Penelitian ini menggunakan citra landsat 8 OLI. Karakteristik citra dalam penginderaan jauh adalah terdapatnya kanal (*band*) panjang gelombang elektromagnetik yang berfungsi merekam radiasi matahari. Daerah panjang gelombang elektromagnetik tampak reflektif, inframerah, pankromatis dan termal dipantulkan dari material yang ada permukaan bumi. Setiap objek memiliki tingkat reflektansi berbeda terhadap radiasi cahaya matahari, sehingga menghasilkan nilai spektral yang bervariasi pada setiap kanal panjang gelombang elektromagnetik (Perdana *et al.* 2022)

Satelit landsat 8 diluncurkan pada tahun 2011 dari *Vandenberg Air Force Base* (VAFB), California, menggunakan wahana peluncur Atlas-V401. Satelit ini beroperasi pada orbit melingkar dan sinkron terhadap matahari dengan ketinggian sekitar 705 km, inklinasi 98,2°, periode orbit 99 menit, resolusi temporal 16 hari, serta waktu lintasan khatulistiwa antara pukul 10.00–10.15. Landsat 8 dilengkapi dengan dua sensor utama, yaitu *Operational Land Imager* (OLI) dan *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Sensor OLI memiliki sembilan kanal, yang terdiri atas satu kanal inframerah dekat, tujuh kanal spektral reflektif pada wilayah tampak, serta satu kanal khusus untuk pendeteksian awan cirrus. Sementara itu, sensor TIRS terdiri atas dua kanal termal yang berfungsi menyediakan kontinuitas data inframerah termal yang tidak diakomodasi oleh sensor OLI (Perdana *et al.* 2022).

Pra Pengolahan Citra

Pra-pengolahan citra terdiri dari impor data, *layer stack*, koreksi geometrik, dan pemotongan citra. Tahap selanjutnya yaitu pembuatan indeks vegetasi berupa *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Ratio Vegetation Index* (RVI), *Transformed Vegetation Index* (TVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Green Red Vegetation Index* (GRVI), dan *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI) serta interpretasi awal hutan rakyat. Pendekatan multi-indeks digunakan agar fungsi masing-masing indeks dapat saling melengkapi untuk mengatasi keterbatasan sensor satelit. Indeks NDVI, TVI, dan GRVI digunakan sebagai indikator standar mengukur tingkat kehijauan dan aktivitas fotosintesis, sedangkan GNDVI dan RVI digunakan untuk mengatasi masalah saturasi citra pada area hutan bertajuk sangat rapat. Di sisi lain, indeks SAVI secara khusus ditambahkan untuk meminimalkan gangguan dari pantulan latar belakang tanah. Hal ini dikarenakan lokasi penelitian masih terdapat area hutan dengan klasifikasi kerapatan sangat rapat. Kombinasi keenam indeks tersebut memastikan proses evaluasi berjalan objektif dan menghasilkan model penduga biomassa yang paling akurat.

Pengambilan Data Lapangan

Pengumpulan data lapangan untuk mengetahui potensi biomassa atas permukaan dilakukan dengan *purposive sampling* pada hutan rakyat. Plot pengukuran yang digunakan berukuran 0,09 ha dengan bentuk plot persegi (30 m x 30 m) pada hutan rakyat dengan intensitas sampling (IS) sebesar

2,5%. Jumlah plot yang diambil tersebar sebanyak 45 yang mewakili setiap kelas kerapatan vegetasi. Kelas kerapatan hutan rakyat diidentifikasi berdasarkan nilai NDVI yang berada pada Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung. Data dari 45 plot tersebut digunakan untuk pembangunan model sebanyak 30 dan 15 untuk uji validasi. Pengumpulan data lapangan dilakukan untuk memperoleh informasi yang komprehensif terkait komponen biomassa pada lokasi penelitian. Data yang dikumpulkan meliputi pohon, nekromassa, tumbuhan bawah, dan serasah.

Dasar pengambilan plot contoh di lapangan menggunakan nilai NDVI di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung dari citra Landsat 8 dengan resolusi spasial 30 m × 30 m. Penggunaan *respons spektral plot* (RSP) diperlukan untuk mengurangi bias karena plot contoh tidak sesuai dengan lokus piksel pada citra. RSP dihitung dari rata-rata 3×3 piksel di setiap lokasi plot contoh lapangan dari citra. Sebaran plot sampling disusun berdasarkan Permenhut No. P12/Menhut-II Tahun 2012 tentang klasifikasi spesifikasi nilai NDVI yang diklasifikasikan menjadi lima kelas kerapatan vegetasi, yaitu lahan tidak bervegetasi (NDVI<0,03), sangat rendah (NDVI 0,03–0,15), jarang (NDVI 0,16–0,25), rapat (NDVI 0,26–0,35), dan sangat rapat (NDVI 0,36–1). Sebaran plot contoh dengan intensitas sampling 2,5%, pada kelas kerapatan sangat rapat dengan luas 1,300 ha, plot contoh sebanyak 38 plot; kelas kerapatan rapat dengan luas 20,4 ha, plot contoh sebanyak 5 plot; dan kelas kerapatan jarang dengan luas 0,09 ha, plot contoh sebanyak 2 plot.

Nilai NDVI dihitung hanya pada hutan rakyat. Hasil klasifikasi kerapatan hutan rakyat menggunakan NDVI berdasarkan citra landsat 8 diperoleh luas hutan rakyat sebesar 1.320,49 ha. Tabel 4 menjelaskan wilayah Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung diklasifikasikan menjadi tiga kelas kerapatan vegetasi berdasarkan nilai NDVI, yaitu kelas sangat rapat, rapat, dan jarang. Kelas sangat rapat mendominasi wilayah penelitian dengan proporsi sebesar 98,45% dari total luas, sedangkan kelas rapat 1,55% dan kelas jarang sebesar 0,01%. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi tutupan vegetasi di wilayah penelitian didominasi oleh kerapatan sangat rapat.

Pengolahan Data Lapangan

1. Perhitungan Biomassa Pohon

Perhitungan biomassa pohon dilakukan dengan menerapkan metode *non-destructive* dengan menggunakan rumus Ketterings *et al.* (2001) yaitu:

$$B = 0,11 \rho D^{2,62} \quad (1)$$

Keterangan : B = biomassa tegakan di atas permukaan tanah (ton/ha); ρ = massa jenis pohon (kg/m³) (ICRAF 2013); dan D = diameter setinggi dada (m)

2. Perhitungan Biomassa Serasah dan Tumbuhan Bawah

Perhitungan biomassa serasah dan tumbuhan bawah dilakukan dengan metode *destructive*. Serasah dan tumbuhan bawah pada subplot contoh dikumpulkan kemudian ditimbang berat basah totalnya sebesar 100 gram. Selanjutnya sampel dikeringkan menggunakan *oven* dengan suhu 80°C selama 48 jam (Pratita 2019). Penentuan biomassa kering total tumbuhan bawah digunakan rumus:

$$BKT = \frac{BKC}{BBC} \times BBT \quad (2)$$

Keterangan : BKT = berat kering total (gr); BKC = berat kering contoh (gr); BBC = berat basah contoh (gr); dan BBT = berat basah total (gr)

3. Pemilihan Peubah Bebas Model

Peubah bebas berupa indeks vegetasi dan diameter lapangan yang digunakan dalam model pendugaan biomassa ditentukan berdasarkan nilai koefisien korelasi yang menunjukkan hubungan cukup kuat hingga kuat terhadap biomassa sebagai peubah terikat menggunakan Minitab 18.

4. Koefisien Korelasi

Nilai korelasi berkisar antara -1 sampai dengan +1. Nilai korelasi semakin mendekati nilai 1 atau -1 mempunyai korelasi semakin kuat. Proses analisis hubungan antara biomassa di atas permukaan tanah dengan nilai peubah lapangan berupa diameter lapangan dan peubah spektral yakni

indeks vegetasi NDVI, SAVI, RVI, TVI, dan TRVI dilakukan menggunakan *software* Minitab 18. Nilai koefisien korelasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X.Y - (\sum_{i=1}^n X)(\sum_{i=1}^n Y)}{\left\{ (\sum_{i=1}^n X^2) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n Y^2}{n} \right) \right\}} \quad (3)$$

Keterangan : R = koefisien korelasi; Xi = peubah X (indeks vegetasi); Yi = peubah Y (biomassa tegakan hutan); dan N = jumlah plot contoh.

5. Uji Normalitas

Uji normalitas data dilakukan untuk memastikan apakah data penelitian mengikuti pola distribusi normal atau tidak dengan menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov*. Pengambilan keputusan didasarkan pada perbandingan nilai signifikansi dengan taraf nyata 5% (Sanny dan Dewi 2020). Uji normalitas terpenuhi apabila nilai *P-value* > 0,05, apabila sudah terpenuhi maka dapat digunakan dengan baik. Hasil uji ini menjadi dasar penting dalam menentukan kelayakan data untuk analisis statistik selanjutnya. Mardiatmoko (2020) menyatakan bahwa model regresi yang baik memiliki nilai residual terdistribusi secara normal.

6. Uji Heteroskedastisitas

Uji heteroskedastisitas digunakan untuk mengetahui adanya perbedaan varians dari residual suatu pengamatan ke pengamatan yang lain. Apabila terjadi perbedaan varians dari residual suatu peubah (indeks vegetasi dan diameter lapangan) dengan peubah yang lain (biomassa), maka keadaan tersebut dapat dikatakan heteroskedastisitas. Model regresi yang baik adalah tidak terjadi heteroskedastisitas, sehingga menyebabkan tidak ada pola yang jelas, serta titik-titik menyebar di atas dan di bawah angka 0 pada sumbu Y (Ghozali 2018). Uji heteroskedastisitas dalam penelitian ini menggunakan uji Glejser dengan menggunakan *software* Minitab 18. Apabila uji Glejser menunjukkan nilai *P-value* > 0,05 maka dapat disimpulkan bahwa model regresi tidak terjadi gejala heteroskedastisitas.

7. Penyusunan Model

Penyusunan model pendugaan biomassa atas permukaan hutan rakyat berdasarkan peubah bebas berupa indeks vegetasi dan gabungan peubah spektral citra landsat 8 dengan peubah lapangan berupa diameter. Berikut model persamaan regresi dalam penelitian ini terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1 Model persamaan regresi

Model	Persamaan dengan indeks vegetasi	Persamaan indeks vegetasi dan diameter
Linear	$B = a + bx$	$B = a + bx + bd$
Polinomial	$B = a + bx + cx^2$	$B = a + bx + dx^2$
Power	$B = ax^b$	$B = ax^b + ax^d$
Eksponensial	$B = ae^{bx}$	$B = ae^{bx, bd}$
Logaritmik	$B = a + b \ln(x)$	$B = a + b \ln(x) + b \ln(d)$

Keterangan: B= peubah terikat (biomassa (ton/ha)); a, b = koefisien regresi; x = peubah bebas (indeks vegetasi); d = diameter (cm)

8. Koefisien Determinan (R²)

Koefisien determinan (R²) merupakan suatu bentuk sederhana untuk menguji kualitas suatu persamaan garis regresi. Secara sederhana nilai koefisien determinasi diperoleh dengan mengkuadratkan koefisien korelasi (Pratita 2019). Nilai R² berada pada rentang 0% hingga 100% dan digunakan sebagai indikator ketelitian maupun keeratan hubungan dari model regresi yang telah dibuat. Semakin besar nilai R², semakin baik kemampuan model dalam menjelaskan hubungan antar variabel. Sebaliknya, nilai R² yang rendah menunjukkan kemampuan penjelasan model terbatas (Imaniar dan Rajriyah 2023). Koefisien determinasi dapat dihitung dengan menggunakan rumus (Draper dan Smith 1992):

$$R^2 = \frac{JKR}{JKT} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan : R^2 = koefisien determinasi; JKR = jumlah kuadrat regresi; JKT = jumlah kuadrat total

9. Simpangan Baku

Simpangan baku semakin baik apabila nilainya semakin kecil, sehingga nilai dugaannya akan semakin teliti. Simpangan baku dapat dihitung dengan persamaan (Draper dan Smith 1992):

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{JKS}{(n-p)}} \quad (5)$$

Keterangan : s = simpangan baku; JKS = jumlah kuadrat sisa; dan $n-p$ = derajat bebas sisa

10. Analisis regresi

Analisis regresi dilakukan berdasarkan uji korelasi, koefisien determinasi (R^2), dan simpangan baku (s). Nilai korelasi digunakan untuk mengetahui keeratan hubungan antara indeks vegetasi dan data lapangan. Nilai R^2 digunakan untuk menduga kemampuan model dalam menjelaskan variasi biomassa atas permukaan. Simpangan baku digunakan untuk mengetahui tingkat penyimpangan hasil pendugaan terhadap data aktual sehingga dapat menunjukkan ketelitian model yang digunakan.

11. Analisis Keragaman

Pengujian model regresi dilakukan menggunakan analisis keragaman melalui uji F dengan membandingkan nilai F_{hitung} dan F_{tabel} pada taraf nyata 5%. Hipotesis yang diuji yaitu $H_0: \beta = 0$ yang menunjukkan bahwa peubah bebas tidak berpengaruh terhadap peubah terikat, dan $H_1: \beta \neq 0$ menunjukkan bahwa peubah bebas berpengaruh terhadap peubah terikat. Kriteria pengujian dilakukan dengan menolak H_0 apabila nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$ dan menerima H_0 apabila nilai $F_{hitung} \leq F_{tabel}$. Nilai jumlah kuadrat, kuadrat tengah, dan derajat bebas digunakan untuk menyusun tabel analisis keragaman regresi.

12. Uji Validitas Model

Setelah seluruh model regresi yang dibangun dinyatakan layak dan dapat diterima secara statistik, tahap selanjutnya adalah melakukan uji validasi menggunakan 15 plot berbeda dengan tingkat kerapatan yang beragam. Uji validasi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan parameter Simpangan Agregat (SA), bias (e), dan *Root Mean Square Error* (RMSE).

Simpangan Agregat (SA) didefinisikan sebagai selisih antara jumlah nilai aktual dan nilai hasil pendugaan yang dinyatakan secara proporsional terhadap nilai dugaan atau sebagai perbedaan antara jumlah nilai aktual dan nilai dugaan (Ramadhan dan Suwadji 2023). Suatu persamaan dikatakan memiliki nilai yang baik apabila SA berada pada antara -1 sampai +1. Nilai SA dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$SA = \left(\frac{\sum E - \sum 0}{\sum E} \right) \quad (5)$$

Kesalahan sistematis yang dapat terjadi akibat ketidaktepatan dalam pengukuran, baik kesalahan teknis pengukuran maupun keterbatasan alat ukur dinyatakan sebagai Bias. Nilai e yang dapat diterima adalah nilai yang mendekati nol (Pratita 2019). e dapat dinyatakan menggunakan rumus:

$$e = \left(\frac{\frac{(O-E)^2}{E}}{n} \right) \times 100\% \quad (6)$$

Root Mean Square Error (RMSE) digunakan untuk mengukur besarnya kesalahan antara nilai hasil pendugaan model dan nilai aktual. Semakin kecil nilai RMSE, semakin rendah tingkat kesalahan yang dihasilkan, sehingga menunjukkan kinerja model yang semakin baik (Achmad *et al.* 2018). Perhitungan RMSE dapat menggunakan rumus:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \frac{(O-E)^2}{E}}{n}} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan : e = bias; n = jumlah plot; RMSE = *Root Mean Square Error*; SA = simpangan agregat; O = biomassa model (ton/ha); dan E = biomassa aktual

13. Pemilihan Model Regresi Terbaik

Penentuan model regresi terbaik didasarkan pada kriteria dengan nilai R^2 tertinggi, serta memiliki tingkat kesalahan yang paling minimal menggunakan parameter s, SA, e, dan RMSE terendah.

14. Peta Sebaran Potensi Biomassa Atas Permukaan

Peta sebaran potensi biomassa atas permukaan disusun berdasarkan persamaan model biomassa terpilih menggunakan metode *natural breaks* pada aplikasi *ArcGIS 10.8*. Pada proses pemetaan biomassa, data diameter pohon diperoleh dari 45 plot yang tersebar di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung. Nilai diameter pada setiap plot kemudian diolah menggunakan *Inverse Distance Weighted* (IDW). Hasil interpolasi IDW berupa peta sebaran kelas diameter, kemudian digabungkan dengan peta indeks spektral menggunakan fitur *Model Builder*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tutupan lahan di Sub-DAS Cikalumpung

Areal hutan rakyat merupakan lahan dengan tutupan lahan berupa hutan, namun secara status berada di luar kawasan hutan. Sub-DAS Cikalumpung memiliki karakteristik tutupan lahan yang cukup beragam, hal ini menunjukkan adanya pemanfaatan wilayah untuk kegiatan kehutanan maupun pertanian. Tutupan lahan didominasi oleh area pertanian dan hutan rakyat. Keberagaman tutupan lahan tersebut berpengaruh terhadap kondisi hidrologi, kemampuan infiltrasi tanah, serta potensi erosi di kawasan DAS (Putri *et al.* 2026).

Tutupan lahan terbesar di Sub-DAS Cikalumpung berupa lahan hutan rakyat seluas 1.320,49 ha. Hutan rakyat memiliki peranan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan, terutama dalam mengurangi limpasan permukaan, meningkatkan penyerapan air ke dalam tanah, serta membantu menjaga kestabilan lereng (Putri *et al.* 2026). Keberadaan hutan rakyat di Sub-DAS Cikalumpung juga menjadi penunjang konservasi tanah dan air di wilayah tersebut. Selain itu, terdapat areal pertanian lahan kering campuran dengan luas mencapai 1.133 ha. Jenis penggunaan lahan ini umumnya terdiri atas kombinasi tanaman tahunan dan tanaman semusim yang dikelola oleh masyarakat. Dominasi pertanian lahan kering campuran menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah dimanfaatkan untuk kegiatan budidaya pertanian. Penggunaan lahan lainnya berupa sawah dengan luas 124,38 ha. Area persawahan umumnya berada pada wilayah yang memiliki ketersediaan air cukup dan topografi yang relatif datar. Sawah berfungsi sebagai lahan produksi pangan sekaligus memiliki kemampuan menahan aliran air permukaan dalam periode tertentu (Badan Perakitan dan Modernisasi Pertanian (BRMP) 2023)). Sementara itu, pertanian lahan kering memiliki luas paling kecil, yaitu 28,03 ha. Lahan ini biasanya dimanfaatkan untuk tanaman semusim tanpa sistem irigasi permanen dan sangat bergantung pada curah hujan. Meskipun luasnya relatif kecil, keberadaan pertanian lahan kering tetap memberikan kontribusi terhadap aktivitas pertanian masyarakat di wilayah Sub-DAS Cikalumpung.

Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung

Surat Keputusan Menteri Kehutanan Nomor 49/Kpts-II/1997 tentang Pendanaan dan Usaha Hutan Rakyat menyatakan bahwa hutan rakyat didefinisikan sebagai hutan yang dimiliki oleh masyarakat dengan luas minimal 0,25 hektar, penutupan tajuk lebih dari 50%, dan jumlah tanaman sedikitnya 500 individu/ha. Secara umum, hutan rakyat tumbuh di atas lahan milik dan berada di luar kawasan hutan negara. Berdasarkan hasil pengamatan di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung,

tingkat rata-rata kerapatan tegakan tercatat sebesar 580 individu/ha, sehingga telah memenuhi kriteria jumlah minimal tanaman dan dapat dikategorikan sebagai hutan rakyat. Melalui definisi di atas, peneliti dan birokrat mengartikan hutan rakyat sebagai hutan yang dimiliki oleh masyarakat, baik secara perseorangan, kelompok, maupun badan hukum, serta hutan rakyat adalah hutan buatan, bukan hutan alam dan berada di luar kawasan hutan negara (Hardjanto 2017).

Menurut Institut Pertanian Bogor (1983), pola pembangunan hutan rakyat dibedakan menjadi dua, yaitu hutan rakyat tradisional dan hutan rakyat inpres. Hutan rakyat tradisional merupakan sistem penanaman tanaman kehutanan yang dikembangkan pada lahan milik masyarakat, khususnya lahan kering, serta dikelola secara mandiri tanpa keterlibatan langsung dari pemerintah. Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung termasuk ke dalam kategori hutan rakyat tradisional. Hal ini ditunjukkan oleh komposisi vegetasi yang bersifat campuran, terdiri dari berbagai jenis tanaman dominan seperti durian (*Durio zibethinus*), melinjo (*Gnetum gnemon*), mahoni (*Swietenia mahagoni*), dan cengkeh (*Syzygium aromaticum*). Komposisi tersebut mencerminkan penerapan sistem pola usaha tani lahan kering atau lahan darat yang sering dijumpai pada pengelolaan hutan rakyat tradisional. Berdasarkan pola tanamnya, Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung juga termasuk ke dalam sistem agroforestri karena menerapkan pola pengelolaan tumpang sari.

Hasil pengolahan citra landsat 8 menggunakan indeks vegetasi NDVI, kerapatan vegetasi di Sub-DAS Cikalumpung terbagi menjadi lima kelas, yaitu tidak bervegetasi, sangat rendah, jarang, rapat, dan sangat rapat. Kelas vegetasi sangat rapat mendominasi wilayah penelitian dengan luas sebesar 1.300 ha. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Sub-DAS Cikalumpung masih memiliki tutupan vegetasi yang baik. Kelas vegetasi sangat rapat memiliki luas 1.300 ha dengan kerapatan 709 individu/ha, kelas rapat memiliki luas sebesar 20,4 ha dengan kerapatan sebesar 543 individu/ha, sedangkan kelas jarang sebesar 0,09 ha dengan kerapatan 487 individu/ha. Area dengan tingkat kerapatan vegetasi yang lebih rendah umumnya berada pada lahan pertanian atau lahan terbuka (Hardianto *et al.* 2021). Hasil tersebut menunjukkan bahwa kerapatan NDVI mampu merepresentasikan kondisi kerapatan vegetasi di lapangan dengan baik, sehingga dapat digunakan untuk menggambarkan tingkat kerapatan dan kondisi tutupan vegetasi pada wilayah Sub-DAS Cikalumpung.

Biomassa Atas Permukaan di Hutan Rakyat

Biomassa adalah jumlah bahan organik yang diproduksi oleh organisme yakni tumbuhan per satuan unit area pada suatu saat. Biomassa dapat dinyatakan dalam ukuran berat, seperti berat kering dengan satuan gram, atau kalori. Kandungan air yang berbeda setiap tumbuhan dapat diukur menggunakan biomassa berdasarkan berat kering. Unit satuan biomassa adalah gr/m² atau ton/ha (Brown 1997). Biomassa di atas permukaan tanah menyumbang bagian terbesar dari total biomassa dibandingkan biomassa di bawah permukaan. Seiring pertumbuhan pohon, bagian batang menjadi komponen dengan proporsi biomassa paling dominan pada setiap ukuran diameter tegakan. Secara keseluruhan, kontribusi biomassa atas permukaan mencapai 80,1% (Pratiwi *et al.* 2021). Biomassa merupakan kunci penting dalam menilai suatu ekosistem untuk memprediksi produktivitas ekosistem, simpanan karbon, pembagian unsur hara, dan akumulasi bahan bakar (Brown 2002). Rata-rata biomassa atas permukaan yang diukur di lapangan berdasarkan kelas kerapatan vegetasi pada kelas kerapatan jarang 71,90 ton/ha, kelas rapat 81,63 ton/ha, dan sangat rapat sebesar 122,51 ton/ha. Rata-rata biomassa pada masing-masing kelas kerapatan vegetasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Rata-rata biomassa atas permukaan pada tahun 2026 di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpung

Kelas kerapatan	Diameter rata-rata (cm)	Kerapatan (ind/ha)	Serasah (ton/ha)	Tumbuhan bawah (ton/ha)	Biomassa atas tegakan (ton/ha)	Biomassa total (ton/ha)
Jarang	27,716	487,04	0,88	0,95	70,075	71,90
Rapat	23,744	543,137	0,66	0,66	80,311	81,63
Sangat rapat	25,412	708,994	0,96	0,75	120,798	122,51
Rata-rata	25,624	579,723	0,83	0,79	90,395	92,02

Berdasarkan data hasil pengamatan, total rata-rata biomassa atas permukaan sebesar 92,02 ton/ha seperti yang terdapat pada Tabel 2. Pada kelas kerapatan jarang (487 individu/ha), biomassa total tercatat sebesar 71,90 ton/ha, sedangkan pada kelas kerapatan rapat (543 individu/ha) meningkat sebesar 81,63 ton/ha, dan mencapai nilai tertinggi pada kelas sangat rapat (709 individu/ha) yaitu 122,51 ton/ha. Hasil tersebut menyatakan bahwa semakin tinggi tingkat kerapatan, maka semakin besar nilai biomassa yang dihasilkan. Hal tersebut sejalan dengan nilai kerapatan individu dan biomassa atas tegakan yang menunjukkan peningkatan, dari 70,075 ton/ha pada kerapatan jarang menjadi 80,311 ton/ha pada kelas rapat, dan semakin meningkat menjadi 120,798 ton/ha pada kerapatan sangat rapat.

Jika dibandingkan dengan penelitian lain di lokasi berbeda, nilai biomassa atas permukaan Hutan Rakyat di Sub-DAS Cikalumpang tergolong kategori sedang (92,02 ton/ha). Pada penelitian Ristiara *et al.* (2017) memperoleh hasil estimasi biomassa atas permukaan pada hutan rakyat dengan sistem agroforestri di Pekon Kelungu, Kabupaten Tanggamus sebesar 216,20 ton/ha. Sedangkan pada penelitian Karina (2017) pada hutan rakyat berbasis agroforestri di Desa Selaawi, Kabupaten Garut memiliki total estimasi biomassa sebesar 148,77 ton/ha. Namun jika dibandingkan dengan penelitian Irundu *et al.* (2023), potensi biomassa pada penelitian ini tidak berbeda jauh. Total biomassa atas permukaan di Hutan Rakyat Agroforestri Kecamatan Bulo Kabupaten Polman sebesar 90,62 ton/ha.

Hasil pengukuran lapang pada tutupan lahan Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang memperoleh nilai biomassa yang tergolong rendah karena kondisi topografi curam dan kelerengan terjal menjadi pembatas utama dalam optimalisasi pertumbuhan tegakan. Keterbatasan akses akibat medan yang sulit menyebabkan intensitas pemeliharaan vegetasi oleh masyarakat menjadi kurang maksimal, sehingga berdampak pada rendahnya kerapatan individu pohon dan diameter batang yang dihasilkan. Selain faktor tersebut, kelerengan yang curam dapat meningkatkan risiko pencucian hara dan erosi tanah sehingga membatasi ketersediaan nutrisi esensial pertumbuhan pohon (Suleman *et al.* 2025).

Model Pendugaan Biomassa Atas Permukaan di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang

Pendugaan biomassa atas permukaan dilakukan dengan menyusun suatu model penduga. Penyusunan model tersebut melalui beberapa tahapan, meliputi uji koefisien korelasi, uji normalitas, uji heteroskedastisitas, pembangunan model, validasi model, serta penentuan model penduga terbaik.

Koefisien Korelasi

Hasil pengolahan data penelitian menunjukkan adanya korelasi positif antara indeks vegetasi dari citra landsat 8 dengan biomassa atas permukaan. Model pendugaan biomassa disusun berdasarkan hubungan antara biomassa hasil pengukuran lapangan dengan nilai indeks vegetasi. Melalui proses uji coba berbagai indeks vegetasi diperoleh enam indeks vegetasi dan diameter lapangan yang menunjukkan tingkat korelasi baik.

Hasil analisis korelasi menunjukkan hubungan antara biomassa dengan berbagai indeks vegetasi menunjukkan variasi kekuatan korelasi yang berbeda. Seluruh indeks vegetasi memiliki korelasi positif terhadap biomassa. Korelasi positif artinya apabila terjadi peningkatan pada nilai indeks vegetasi, maka estimasi biomassa yang dihasilkan akan meningkat. Nilai korelasi tertinggi terhadap biomassa ditunjukkan oleh indeks GNDVI sebesar 0,470, yang termasuk dalam kategori korelasi cukup kuat karena memiliki nilai $>0,40$. Hal ini menunjukkan bahwa GNDVI merupakan indikator yang paling baik dalam menduga biomassa dibandingkan indeks lainnya. Indeks vegetasi lainnya seperti NDVI dan RVI menunjukkan nilai korelasi tergolong cukup kuat dengan biomassa, masing-masing sebesar 0,468 dan 0,402. Nilai ini mengindikasikan bahwa kedua indeks tersebut memiliki kemampuan yang baik dalam mengestimasi biomassa. NDVI dan RVI berbasis kanal hijau cenderung lebih sensitif terhadap kandungan klorofil dan sangat sensitif terhadap perubahan jumlah vegetasi.

Indeks TVI menunjukkan korelasi positif sebesar 0,367 yang masih tergolong sedang, sehingga tetap dapat digunakan sebagai alternatif dalam estimasi biomassa. Di sisi lain, SAVI dan GRVI

memiliki korelasi lebih rendah sebesar 0,20 yang menunjukkan bahwa sensitivitas indeks ini terhadap biomassa relatif lebih kecil dibandingkan indeks lainnya. Selain hubungan antara biomassa dan masing-masing indeks vegetasi, hasil uji korelasi antar indeks vegetasi juga menunjukkan adanya hubungan yang sangat kuat pada beberapa pasangan indeks vegetasi. Berdasarkan hasil, indeks vegetasi NDVI dan TVI memiliki korelasi yang sangat tinggi (0,943), diikuti oleh NDVI dengan GNDVI (0,911), serta NDVI dengan RVI (0,899). Tingginya nilai korelasi ini menunjukkan adanya kesamaan karakteristik dalam menangkap informasi vegetasi. Namun demikian, perbedaan nilai korelasi terhadap biomassa tetap menjadi dasar menentukan indeks yang paling optimal digunakan.

Selain indeks vegetasi, variabel diameter pohon juga menunjukkan hubungan yang sangat kuat terhadap biomassa dengan nilai korelasi sebesar 0,798. Nilai ini merupakan yang tertinggi dibandingkan variabel lainnya, sehingga menegaskan bahwa diameter memiliki keterkaitan yang sangat erat dengan biomassa. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar diameter tegakan, maka biomassa yang dihasilkan juga semakin meningkat. Oleh karena itu, diameter merupakan variabel yang sangat representatif dalam menggambarkan kondisi biomassa di lapangan.

Hasil keseluruhan analisis, dapat disimpulkan bahwa meskipun hampir seluruh indeks vegetasi menunjukkan hubungan positif dengan biomassa, tingkat kekuatannya berbeda-beda. GNDVI, NDVI, dan RVI merupakan indeks yang relatif lebih baik dalam merepresentasikan biomassa. Namun, jika dibandingkan dengan variabel lapangan, diameter (ha) menunjukkan hubungan yang paling kuat dan konsisten, sehingga sangat penting untuk dipertimbangkan dalam analisis maupun validasi estimasi biomassa.

Uji Normalitas

Uji normalitas pada penelitian ini menggunakan metode *Kolmogorov Smirnov* dengan *software* Minitab 18. Metode *Kolmogorov-Smirnov* juga digunakan pada penelitian Dewi (2018). Pengujian normalitas didapatkan hasil *P-value* pada setiap model yang dibangun memiliki nilai lebih dari 0,05 sehingga uji tersebut terpenuhi dan model tersebut dapat digunakan dengan baik karena terdistribusi secara normal.

Uji Heteroskedastisitas

Uji heteroskedastisitas bertujuan menguji apakah dalam model regresi terjadi ketidaksamaan *variance* dari residual satu pengamatan ke pengamatan yang lain (Weston dan Copeland 1995). Model regresi yang baik adalah tidak terjadi adanya heteroskedastisitas atau memiliki nilai *variance* yang tetap. Pada penelitian ini, pengujian heteroskedastisitas memperoleh nilai antara 0,097–1,000. Pengujian heteroskedastisitas menggunakan uji *Glejser* yang menunjukkan nilai *P-Value* >0,05 maka dapat disimpulkan bahwa model regresi yang dibangun tidak terjadi gejala heteroskedastisitas.

Pembangunan Model Penduga Biomassa Atas Permukaan di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang

Model penduga biomassa pada penelitian ini menggunakan peubah diameter lapangan ton/ha dan indeks vegetasi berupa NDVI, TVI, RVI, dan GNDVI. M11 (*power*) menggunakan peubah indeks vegetasi berupa NDVI dan Diameter memiliki nilai R^2 tertinggi sebesar 77,42%. Angka tersebut mengindikasikan bahwa NDVI dan Diameter dengan biomassa atas permukaan berpengaruh signifikan. Adapun rincian mengenai model persamaan pendugaan biomassa terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3 Model persamaan penduga biomassa atas permukaan

Model	Model regresi	Persamaan regresi	s	R ²	F _{hitung}	F-Tabel
M1	Linear	19,5 + 244,5 NDVI	34,6951	21,92	7,86	4,2
M2	Linear	12,0 + 301 GNDVI	34,6604	22,08	7,93	4,2
M3	Power	5,455 + NDVI ^{0,785}	0,281056	24,17	8,93	4,2
M4	Power	5,972 + TVI ^{1,573}	0,296385	15,68	5,21	4,2
M5	Eksponensial	Exp (3,833+(2,201 NDVI))	0,277097	26,29	9,99	4,2
M6	Eksponensial	Exp (3,751 + (2,744 GNDVI))	0,27529	27,25	10,49	3,35
M7	Logaritmik	224,7 + 100,5 ln(GNDVI)	34,6743	22,02	7,9	4,2

Model	Model regresi	Persamaan regresi	s	R ²	F _{hitung}	F-Tabel
M8	Logaritmik	$38,6 + 93,0 \ln(\text{RVI})$	35,7502	17,1	5,78	4,2
M9	Polinomial kuadrat	$-47 + 653 \text{ GNDVI} - 506 \text{ GNDVI}^2$	35,1978	22,51	3,92	3,35
M10	Polinomial kuadrat	$38 + 147 \text{ NDVI} + 125 \text{ NDVI}^2$	35,3177	21,98	3,8	3,35
M11	Power	$2,237 + \text{NDVI}^{0,347} + \text{Diameter}^{0,957}$	0,156176	77,42	46,29	3,35
M12	Power	$2,317 + \text{TVI}^{0,641} + \text{Diameter}^{0,994}$	0,162114	75,67	41,99	3,35
M13	Power	$1,535 + \text{RVI}^{0,390} + \text{Diameter}^{0,972}$	0,156555	77,31	46	3,35
M14	Eksponensial	$\text{Exp}(3,341 + (0,1737 \text{ RVI}) + (0,04962 \text{ Diameter}))$	0,165021	74,79	40,06	3,35
M15	Eksponensial	$\text{Exp}(2,975 + (1,688 \text{ TVI}) + (0,05045 \text{ Diameter}))$	0,163498	73,43	37,3	3,35

Penyusunan model penduga biomassa atas permukaan pada Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang menggunakan analisis regresi antara peubah terikat indeks vegetasi dan diameter lapangan serta peubah bebas berupa biomassa atas permukaan. Ketepatan model diukur berdasarkan kemampuan prediktifnya yang dicerminkan oleh koefisien determinasi (R^2) tinggi dan nilai simpangan baku kecil. Hasil model penduga biomassa menunjukkan model regresi yang dibangun menyajikan capaian nilai R^2 yang beragam. Berdasarkan Tabel 3, model M1–M10 memiliki nilai R^2 rendah karena model-model tersebut hanya dibangun berdasarkan hubungan prediktif tunggal antara peubah spektral berupa indeks vegetasi dan biomassa. Sebaliknya, model M11–M15 memiliki nilai R^2 yang tinggi karena dibangun berdasarkan gabungan peubah spektral dan peubah lapangan, yaitu berupa indeks vegetasi dan diameter lapangan dengan biomassa atas permukaan. Peningkatan ketepatan yang signifikan pada model M11–M15 ini disebabkan oleh penerapan model dengan struktur yang lebih komprehensif, nilai spektral dari citra satelit umumnya hanya mampu merepresentasikan kondisi kerapatan tajuk, sehingga penambahan variabel biofisik lapangan seperti diameter sangat krusial dalam mengestimasi biomassa maupun akumulasi volume kayu secara struktural. Oleh karena itu, penambahan variabel berupa peubah data lapangan dapat meminimalkan tingkat bias dan meningkatkan kemampuan prediktif model.

Penggunaan indeks vegetasi dalam estimasi biomassa secara *remote sensing* menawarkan efisiensi tinggi dibandingkan pengukuran *destructive* di lapangan. Pangestu *et al.* (2025) menyatakan bahwa biomassa merupakan indikator penting produktivitas ekosistem hutan. Hasil analisis menunjukkan bahwa M11 (*power*) memiliki nilai R^2 tertinggi sebesar 77,42% yang memiliki nilai simpangan baku terkecil dan nilai F_{hitung} lebih besar dibandingkan F_{tabel} , sehingga model tersebut signifikan secara statistik dan layak digunakan dalam pendugaan biomassa. Penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, menggunakan indeks vegetasi yang berbeda-beda. Pada penelitian Hadi (2018) menggunakan indeks vegetasi NDVI, SR, GNDVI, TDVI, PVI, VARI, SAVI dan OSAVI dengan nilai SR memiliki korelasi terbaik dengan koefisien korelasi $R = 0,72$ dan koefisien determinasi $R^2 = 0,52$. Sedangkan pada penelitian Pangestu *et al.* (2025) membandingkan indeks vegetasi NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, RVI, TVI, dan NDWI. Penelitian tersebut menyatakan bahwa nilai NDWI memiliki hubungan paling kuat dengan nilai R^2 sebesar 0,58 dan RMSE senilai 0,64.

Nilai R^2 merupakan nilai untuk mengukur tingkat kemampuan model dalam menerangkan keragaman variasi model antara indeks vegetasi dan biomassa (Ghozali dan Imam 2018). Semakin besar nilai R^2 maka kemampuan variabel-variabel yang dibangun memiliki tingkat efektivitas model dalam mempresentasikan variabilitas data. Sebaliknya, nilai yang semakin kecil menunjukkan bahwa variabel-variabel yang dibangun mengindikasikan terbatasnya kemampuan model dalam menerangkan variasi data tersebut. Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh model penduga memiliki nilai F_{hitung} lebih besar daripada F_{tabel} pada taraf nyata 5%. Hasil tersebut menunjukkan adanya keterkaitan nyata antara indeks vegetasi dalam menduga biomassa atas permukaan.

Validasi Model

Uji validasi merupakan salah satu cara untuk mengukur tingkat akurasi suatu model penelitian dengan membandingkan hasil observasi terhadap fakta teoritis (Sanaky *et al.* 2021). Uji validasi pada penelitian ini menggunakan data yang berbeda dari penyusunan model sebanyak 15 plot contoh. Penelitian ini sejalan dengan Kansil *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa validasi model dapat menggunakan data berbeda dari penyusunan model. Validasi yang digunakan menggunakan uji R^2 tertinggi, dan SA, e, serta RMSE terendah. Hasil uji validasi terdapat pada Tabel 4.

Model proyeksi dikategorikan memiliki nilai yang baik apabila memiliki nilai R^2 yang tinggi, memiliki nilai SA berkisar antara -1 sampai dengan +1. Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4, nilai SA yang diperoleh berkisar antara -0,08089 sampai dengan -0,4484, sedangkan performa SA paling optimal terdapat pada model M13 dengan nilai mendekati nol sebesar -0,08089. Selain itu, nilai bias digunakan untuk merepresentasikan besarnya kesalahan sistematis seperti keterbatasan alat maupun terjadinya kesalahan teknis selama proses pengukuran lapangan. Kriteria model yang baik ditandai dengan nilai bias mendekati 0. Sementara itu, tingkat ketepatan model secara keseluruhan diukur melalui parameter RMSE. Nilai RMSE semakin rendah mengindikasikan bahwa tingkat akurasi model semakin tinggi. Berdasarkan hasil uji validasi, model yang memiliki nilai RMSE terendah adalah M12 sebesar 1,392%.

Tabel 4 Hasil uji validasi model

Model	R^2	Simpangan Agregat (SA)	Bias (e)	RMSE
M1	21,92	-0,4591	34,570	5,880
M2	22,08	-0,4484	30,055	5,482
M3	24,17	-0,4015	28,788	5,365
M4	15,68	0,9569	83,547	9,140
M5	26,29	0,9033	74,563	8,635
M6	27,25	-0,4107	26,844	5,181
M7	22,02	-0,4373	28,819	5,368
M8	17,1	-0,4626	32,413	5,181
M9	22,51	-0,4400	29,167	5,401
M10	21,98	-0,4681	35,133	5,927
M11	77,42	-0,1006	2,833	1,683
M12	75,67	-0,0824	1,939	1,392
M13	77,31	-0,0808	1,981	1,407
M14	74,79	-0,1210	2,859	1,691
M15	73,43	-0,0917	2,104	1,451

Pemilihan Model Penduga Terbaik

Hasil penilaian model penduga biomassa dievaluasi menggunakan tiga parameter validasi, yakni SA, e, dan RMSE menggunakan sistem *skoring*. Hasil evaluasi pada Tabel 5, M12 dan M13 memperoleh nilai validasi yang hampir sama. Kedua model tersebut memiliki performa terbaik dalam menduga biomassa. M12 menggunakan persamaan $B = 2,317 + 0,641(TVI) + 0,994(Diameter)$ dengan nilai R^2 sebesar 75,67%, sedangkan M13 dengan persamaan $B = 1,535 + 0,390(RVI) + 0,972(Diameter)$ memperoleh nilai R^2 sebesar 77,31%. Meskipun kedua model memiliki tingkat akurasi relatif setara, M13 dipilih sebagai model terbaik karena memiliki kemampuan RVI dan diameter lebih tinggi dalam menjelaskan variasi biomassa.

Tabel 5 Hasil penilaian model penduga biomassa terbaik berdasarkan parameter validasi

Model	Skor				Jumlah skor
	R^2	Simpangan Agregat (SA)	Bias (e)	RMSE	
M1	13	11	12	12	48
M2	10	10	10	11	41
M3	8	6	7	8	29
M4	15	15	15	15	60
M5	7	14	14	14	49

Model	Skor				Jumlah skor
	R ²	Simpangan Agregat (SA)	Bias (e)	RMSE	
M6	6	7	6	6	25
M7	11	8	8	9	36
M8	14	12	11	6	43
M9	9	9	9	10	37
M10	12	13	13	13	51
M11	1	4	4	4	13
M12	3	2	1	1	7
M13	2	1	2	2	7
M14	4	5	5	5	19
M15	5	3	3	3	14

Keterangan: semakin kecil nilai skor, maka semakin baik kinerja model dalam menduga biomassa.

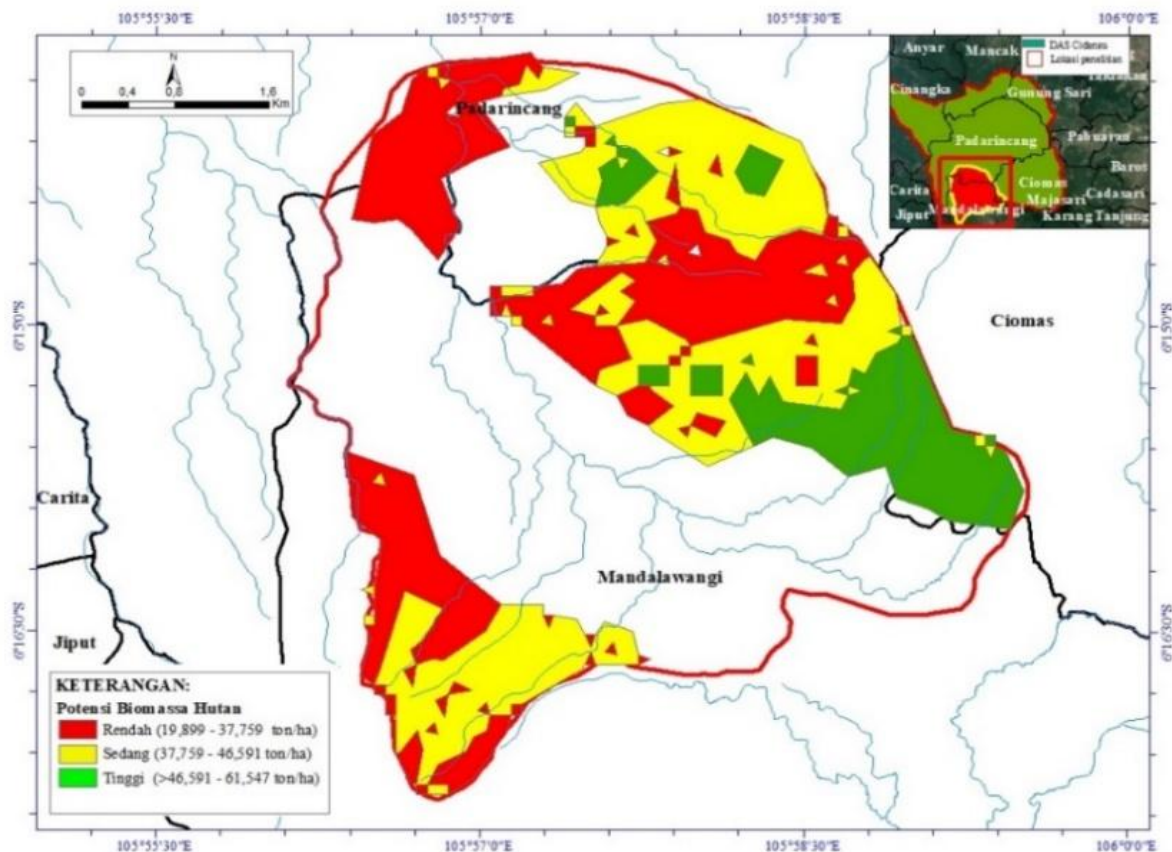
RVI dan TVI merupakan indeks vegetasi yang memanfaatkan reflektansi kanal NIR dan RED. Namun, kedua indeks tersebut memiliki karakteristik spektral yang berbeda. RVI dihitung berdasarkan rasio langsung antara kanal NIR dan RED sehingga memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan kerapatan tajuk, indeks luas daun (*Leaf Area Index/LAI*), dan akumulasi biomassa vegetasi. Selain itu, RVI cenderung lebih mampu mempertahankan respons spektralnya pada kondisi vegetasi yang sangat rapat sehingga lebih tahan terhadap fenomena saturasi indeks (Gao *et al.* 2023). Hal ini sesuai dengan keadaan kerapatan tajuk yang berada di Hutan Rakyat SUB-DAS Cikalumpang yang 98,45% terdiri dari kerapatan tajuk sangat rapat. Oleh karena itu, RVI mampu memberikan informasi yang lebih representatif mengenai variasi biomassa pada area penelitian.

Selain memiliki nilai R² yang lebih tinggi, M13 juga menempati peringkat pertama pada parameter SA. Parameter ini menunjukkan tingkat kedekatan antara total biomassa hasil pendugaan dengan total biomassa aktual. Nilai SA yang rendah mengindikasikan bahwa model mampu menghasilkan estimasi total biomassa yang lebih akurat. Oleh karena itu, meskipun model M12 dan M13 memiliki performa uji validasi yang baik dan menunjukkan stabilitas statistik yang sama-sama tinggi, model M13 dinilai lebih unggul karena mampu menggabungkan keunggulan statistik dan keunggulan spektral secara bersamaan.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, model M13 (*power*) dengan indeks vegetasi RVI menggunakan persamaan $B = 1,535 + 0,390(RVI) + 0,972(\text{Diameter})$ dipilih sebagai model terbaik dalam penelitian ini. Pemilihan model tersebut tidak hanya didasarkan pada nilai statistik yang lebih baik, khususnya nilai R² yang lebih tinggi, nilai SA terendah, nilai e dan RMSE yang lebih rendah jika dibandingkan dengan model persamaan lainnya, serta sesuai dengan karakteristik spektral indeks RVI dengan kondisi tegakan di Hutan Rakyat SUB-DAS Cikalumpang yang didominasi oleh kerapatan tajuk tinggi.

Peta Sebaran Potensi Biomassa Atas Permukaan Hutan

Sub-DAS Cikalumpang berdasarkan tutupan lahannya terdiri dari hutan rakyat (1.320,49 ha), pertanian lahan kering (28,03 ha), pertanian lahan kering campuran (1.133 ha) dan sawah seluas (124,38 ha). Peta sebaran potensi biomassa dibuat berdasarkan model persamaan terpilih, yaitu model *power* $B = 1,535 + RVI^{0,390} + \text{Diameter}^{0,972}$. Peta sebaran potensi biomassa di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta sebaran biomassa di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang

Hasil klasifikasi diperoleh tiga kelas potensi biomassa, yaitu kelas rendah sebesar 19,899–37,759 ton/ha yang mencakup luas area sebesar 534,28 ha, kelas sedang dengan rentang 37,759–46,591 ton/ha pada luas area 556,07 ha, serta kelas tinggi antara 46,591–61,547 ton/ha seluas 230,14 ha. Namun, estimasi biomassa berbasis citra satelit yang diintegrasikan dengan data interpolasi cenderung menghasilkan nilai dugaan lebih rendah (*underestimate*) karena efek penghalusan selama proses interpolasi IDW. Nilai estimasi biomassa berbasis citra satelit yang diintegrasikan dengan data interpolasi cenderung menghasilkan nilai dugaan lebih rendah (*underestimate*) dibandingkan dengan kondisi aktual di lapangan. Penaksiran ini utamanya dipicu oleh efek penghalusan (*smoothing effect*) selama proses interpolasi IDW. Hal ini dikarenakan nilai-nilai ekstrem dari tegakan berdiameter sangat besar tereduksi karena dirata-ratakan dengan ukuran pohon di sekitarnya. Selain faktor tersebut, kondisi *underestimate* juga dipengaruhi oleh keterbatasan sensor optik penginderaan jauh yang rentan mengalami saturasi (titik jenuh) pada area hutan dengan kepadatan tajuk tinggi, serta adanya efek piksel campuran (*mixed pixel*) yang menekan nilai pantulan *spektral* pada indeks vegetasi.

SIMPULAN

Estimasi potensi biomassa atas permukaan di Hutan Rakyat Sub-DAS Cikalumpang dapat diduga melalui model regresi terbaik yakni $B = 1,535 + RVI^{0,390} + Diameter^{0,972}$. Model ini memiliki nilai R^2 sebesar 77,31% dan memiliki hasil validasi terbaik. Implementasi model tersebut menghasilkan peta spasial sebaran biomassa yang terbagi ke dalam tiga kategori kelas klasifikasi, meliputi kelas rendah sebesar 19,899–37,759 ton/ha yang mencakup luas area sebesar 534,28 ha, kelas sedang dengan rentang 37,759–46,591 ton/ha pada luas area 556,07 ha serta kelas tinggi antara 46,591–61,547 ton/ha yang meliputi area seluas 230,14 ha.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad E, Nursanti, Manalu JHB. 2018. Model spasial pendugaan biomassa di atas permukaan tanah di Hutan Nagari Padang Limau Sundai Kabupaten Solok Selatan Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Silva Tropika*. 2(3): 67–76.
- Amrizal AY. 2017. Pendugaan biomassa tegakan jati menggunakan citra landsat 8 OLI di Perum Perhutani KPH Ciamis [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- [BRMP] Badan Perakitan dan Modernisasi Pertanian. 2023. BSIP berkarya: pentingnya pengolahan tanah sawah. <https://tanahpupuk.brmp.pertanian.go.id/berita/bsip-berkarya-pentingnya-pengolahan-tanah-sawah> Diakses pada tanggal 7 Mei 2026.
- Brown S. 1997. *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer*. Rome (IT): FAO Forestry Paper.
- Brown S. 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environ Pollut*. 116:363–372.
- Dewi NMTG. 2018. Model penduga biomassa hutan lahan kering menggunakan citra resolusi tinggi berbasis piksel dan visual di Kalimantan Timur [skripsi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Draper N, Smith H. 1992. *Analisis Regresi Terpadu Edisi 2 Terjemahan*. Jakarta (ID): Gramedia Pustaka Utama.
- Fassnacht FE, White JC, Wulder MA, Næsset E. 2023. Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 97(1): 11–37.
- Gao S, Zhong R, Yan K, Ma X, Chen X, Pu J, Gao S, Qi J, Yin G, Myneni RB. 2023. *Evaluating the saturation effect of vegetation indices in forests using 3D radiative transfer simulations and satellite observations*. *Remote sensing of Environment*. 295(113665): 1–18.
- Ghozali, Imam. 2018. Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS 25. Semarang (ID): Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- Hadi AR. 2018. Pendugaan cadangan karbon berdasarkan indeks vegetasi. [skripsi]. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardianto A, Dewi PU, Feriansyah T, Sari NFS, Rifiana NS. 2021. Pemanfaatan citra landsat 8 dalam mengidentifikasi nilai indeks vegetasi kerapatan vegetasi (NDVI) tahun 2013 dan 2018 (area studi: Kota Bandar Lampung). *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*. 2(2): 8–15.
- Hardjanto. 2017. *Pengelolaan Hutan Rakyat*. Bogor: IPB Press.
- Heriyanto NM, Priatna D, Samsudin I. 2020. Vegetation structure and carbon stocks in secondary forests of Muara Merang Forest Complex, South Sumatera. *Jurnal Sylva Lestari*. 8(2): 230. <https://doi.org/10.23960/jsl28230-240>.
- Hutan Ketapang Indonesia. 2021. Estimasi stok karbon menggunakan metode analisis indeks vegetasi normalized difference vegetation index (NDVI) di Areal Konsensi PT. Hutan Ketapang Industri. Riset Pendugaan Cadangan Karbon Hutan di dalam Areal Konsensi PT. HKI. 1–10.
- [ICRAF] World Agroforestry Centre. 2013. Wood density database [internet]. [diunduh 18 Februari 2026]. Tersedia pada: <https://www.worldagroforestry.org/output/wood-density-database>
- Imaniar AO, Rajriyah R. 2023. Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat kemiskinan Kabupaten Jombang dengan regresi linier berganda. *Emerging Statistics and Data Science Journal*. 1(3): 308–319.
- [IPB] Institut Pertanian Bogor. 1983. Studi Kelayakan Usahatani Hutan Rakyat di Provinsi Jawa Barat. Lembaga Penelitian IPB.
- IPCC, Sixth AR. 2021. *The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity; In Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. United Kingdom (UK): Cambridge University Press.
- Irundu D, Idris AI, Sudiarmiko, Prayogi II. 2023. Biomassa dan karbon tersimpan diatas tanah pada hutan rakyat agroforestri. *Jurnal Hutan dan Masyarakat*. 15(1): 32–41.

- Kansil RAM, Muhdin, Marnaek RH. 2024. Penyusunan dan validasi model alometrik biomassa pohon eukaliptus hibrida di Unit Pengelolaan Hutan Tanaman di Sumatra Utara. *Jurnal ForestrIndo*. 1(2): 150–161.
- Karina M. 2017. Potensi simpanan karbon pada hutan rakyat berbasis agroforestri di Desa Selaawi Kabupaten Garut [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Kementerian Kehutanan. 2012. Pedoman Penggunaan Model Alometrik untuk Pendugaan Biomassa dan Stok Karbon Hutan di Indonesia. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Konservasi dan Rehabilitasi, Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan.
- Ketterings QM, Coe R, Noordwijk M, Ambagau Y, Palm CA. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*. 146: 199–209.
- Lestari TA, Rahadian A, Purwanto MYJ, Wientarsih I. 2016. Persamaan alometrik biomassa dan massa karbon *Avicennia Marina* (forsk.) Vierh. Studi kasus Cagar Alam Pulau Dua Banten. *Jurnal Silvikultur Tropika*. 7(2): 95–107.
- Lillesand TTR, Kiefer RW. 1997. Penginderaan Jauh Interpretasi Citra. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada Press.
- Lillesand TM, Kiefer RW, Jonathan WC. 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York (NY): John Wiley and Sons.
- Lubis AIM, Prasetyo Y, Sasmito B. 2020. Pemodelan dan pemetaan biomassa atas permukaan (aboveground biomass) tanaman karet (*Hevea brasiliensis*) dengan L-band berdasarkan pengamatan alos palsar-2 (studi kasus: Afdeling setro, Kab. Semarang). *Jurnal Geodesi Undip*. 9(2): 122–131.
- Mardiatmoko G. 2020. Pentingnya uji asumsi klasik pada analisis regresi linier ganda (studi kasus penyusunan persamaan alometrik kenari muda (*Canarium indicum* L.)). *Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*. 14(3): 333–342.
- Nurlita D, Putri ILE, Chatri M. 2025. Analisis kerapatan vegetasi hutan di Gunung Padang untuk memahami ekosistem. *Jurnal Biosense*. 8(2): 118–130.
- Pangestu AG, Amin A, Sari NA, Hasibuan MM. 2025. Forest biomass modeling based on landsat-8 spektral indices using google earth engine. *Jurnal Biologi Tropis*. 26(4): 6014–6022.
- Perdana AM, Pratama AY, Fauzi AI, Welly TK, Nurtyawan R. 2022. Analisis spasio-temporal kekeringan pada lahan sawah di Lampung Selatan berbasis pengolahan Normalized Difference Drought Index pada Citra Satelit Landsat 8. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*. 3(1):1–9.
- [Permen] Peraturan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.12/Menhut-II Tahun 2012 Tentang Tata Cara Penyusunan Rencana Pengelolaan Hutan Produksi Lestari dan Rencana Kerja Usaha Pemanfaatan Hasil Hutan Kayu pada Hutan Alam dan Hutan Tanaman. 2012.
- Pratita WA. 2019. Pendugaan biomassa atas permukaan menggunakan citra satelit landsat 8 OLI di Kawasan Hutan Kabupaten Lampung Selatan [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Pratiwi G, Sasmito B, Bashit N. 2021. Analisis prediksi nilai biomassa atas permukaan (aboveground biomass) pohon karet menggunakan citra sentinel-1A terhadap usia tegakan. *Jurnal Geodesi dan Geomatika*. 4(1): 27–33.
- Purwanto A. 2016. Pemanfaatan citra landsat 8 untuk identifikasi Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) di kecamatan silat hilir kabupaten Kapuas Hulu. *Jurnal Pendidikan*. 13(1): 27–36.
- Putri HNT, Lestari AD, Zahira NF, Nuraeni E. 2026. Pengaruh tutupan lahan terhadap retensi air dan konservasi tanah di hutan tropis: suatu kajian literatur. *Jurnal Biosense*. 9(1): 283–295.
- Ramadhan A, Suwadi S. 2023. Model penduga biomassa hutan mangrove menggunakan citra satelit sentinel 2A di Kabupaten Rembang Jawa Tengah. *Jurnal Wana Trpoika*. 13(2): 72–84.
- Ristiara L, Hilmanto R, Duryat. 2017. Estimasi karbon tersimpan pada hutan rakyat di Pekon Kelungu, Kabupaten Tanggamus. *Jurnal Sylva Lestari*. 5(1): 128–138.

- Sanaky MM, Saleh LM, Titaley HD. 2021. Analisis faktor-faktor penyebab keterlambatan pada proyek pembangunan gedung asrama MAN 1 Tulehu Maluku Tengah. *Jurnal Simetrik*. 11(1): 432–439.
- Sanny BI, Dewi RK. 2020. Pengaruh net interest margin (NIM) terhadap return on asset (ROA) pada PT Bank Pembangunan Daerah Jawa Barat dan Banten Tbk periode 2013-2017. *Jurnal E-Bis (Ekonomi Bisnis)*. 4(1): 78–87.
- Sari DR, Haniy SU, Rizki M. 2021. Manusia adalah kunci melawan krisis iklim. [diakses pada tanggal 03 Januari 2025]. <https://wri-indonesia.org/id/wawasan/manusia-adalah-kunci-melawan-krisis-iklim-aplikasi-emisi-versi-terbaru-bisa-membantu>.
- Sarifuddin A, Adiwibowo S, Mardiana R. 2020. Apakah PES dapat merubah struktur agraria? Sebuah pembelajaran Desa Citaman, Banten. *Jurnal Sosiologi Pedesaan*. 8(1): 105–122.
- Suleman D, Alam A, Rustam LO, Yusuf DN. 2025. Pengaruh kemiringan lereng terhadap kualitas tanah pada pertanaman nilam di Kecamatan Wolasi, Kabupaten Konawe Selatan. *Journal of Sustainable Dryland Agriculture*. 18(1): 76–86.
- Weston, Copeland. 1995. *Manajemen Keuangan (1st ed.)*. Gelora Aksara Pratama.
- World Resources Institute (WRI) Indonesia. 2016. *Menginterpretasikan INDC: Menilai Transparansi Target Emisi Gas Rumah Kaca Pasca 2020 Dari 8 Negara Penyumbang Emisi Terbesar*. Washington, DC: Open Climate Network (OCN).
- Zulkarnaen RN. 2020. Struktur vegetasi dan simpanan karbon hutan rakyat Desa Sambak, Magelang, Jawa Tengah. *Buletin Kebun Raya*. 23(2): 104–11.