

Analisis Persebaran Keanekaragaman Hayati pada Pohon dan Potensinya Dalam Penyerapan Emisi Karbon di Wilayah Perkotaan Menggunakan Data Foto Udara dan Lidar (Studi Kasus: Kelurahan Darmo, Kota Surabaya)

Faisal Adam Yudithia, Lalu Muhamad Jaelani, dan Hepi Hapsari Handayani
Departemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS),
e-mail: lmjaelani@geodesy.its.ac.id

Abstrak—Fenomena urbanisasi yang cepat di zaman modern ini menimbulkan banyak masalah di berbagai aspek, salah satunya aspek lingkungan, khususnya di wilayah perkotaan seperti Kota Surabaya. Kota ini merupakan salah satu wilayah metropolitan yang menjadi pusat perekonomian dengan pertumbuhan yang cepat. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan percepatan pembangunan, optimalisasi fungsi ruang terbuka hijau (RTH) sebagai penyerap emisi karbon menjadi hal penting untuk diperhatikan. Oleh sebab itu, penelitian ini ditujukan untuk mengetahui persebaran keanekaragaman hayati pada pohon dan potensinya dalam penyerapan emisi karbon di salah satu wilayah padat, yaitu Kelurahan Darmo, Kota Surabaya. Pengamatan spesies pohon dilakukan menggunakan data *orthophoto* dan *light detection and ranging* (lidar). Untuk mengetahui jumlah pohon berdasarkan tutupan kanopinya, penelitian ini menggunakan algoritma *local maxima*, serta metode klasifikasi berbasis objek untuk menentukan spesiesnya. Dengan memanfaatkan kedua data melalui metode tersebut, dihasilkan tingkat kesesuaian klasifikasi dengan akurasi kappa sebesar 0,64. Sejumlah 5.429 dari 6.778 pohon yang ada di Kelurahan Darmo teridentifikasi sebagai individu pohon yang diketahui spesiesnya, terdiri dari: *Albizia julibrissin*, *Cerbera manghas*, *Ficus benjamina*, *Plumeria rubra*, *Polyalthia longifolia*, *Pterocarpus indicus*, *Roystonea regia*, *Tamarindus indica*, dan *Terminalia catappa*. *Albizia julibrissin* merupakan spesies pohon yang mendominasi di kelurahan ini dengan indeks nilai penting (INP) sebesar 0,42 berdasarkan hasil analisis dominansi vegetasi. Melalui perhitungan *average nearest neighbor*, diketahui bahwa 80,0% kondisi setiap spesies pohon di kelurahan ini memiliki kecenderungan pola persebaran yang menggerombol. Berdasarkan jumlah dan spesies pohon yang diketahui, maka diduga Kelurahan Darmo memiliki cadangan karbon sejumlah 574,8 ton C. *Pterocarpus indicus* merupakan spesies pohon yang paling berpengaruh terhadap penyimpanan cadangan karbon di kelurahan tersebut dengan jumlah 96,7 ton C atau 16,8% dari keseluruhan cadangan karbon di kelurahan tersebut. Jumlah cadangan karbon di Kelurahan Darmo jika dikonversi menjadi kemampuan pohon dalam penyerapan emisi karbon dioksida setara dengan 2.107,7 ton CO₂.

Kata Kunci—Cadangan Karbon, Klasifikasi Berbasis Objek, Perkotaan, Spesies Pohon.

I. PENDAHULUAN

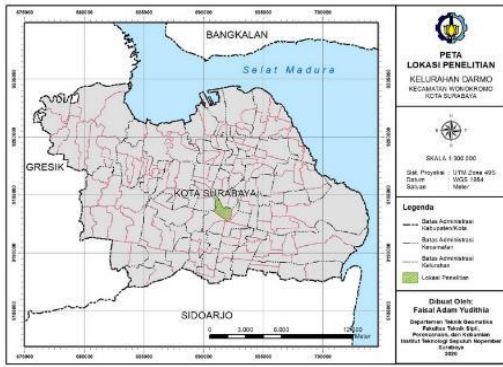
URBANISASI yang cepat telah menjadi salah satu fenomena yang paling khas di zaman modern di seluruh dunia. Rujukan [1] menerangkan bahwa Indonesia ditempatkan di urutan ke-10 sebagai negara dengan tingkat urbanisasi tertinggi di dunia yang dihitung pada rentang

tahun 1990–2014. Kota Surabaya adalah bagian dari wilayah metropolitan yang memiliki tingkat kegiatan ekonomi dan pemerintahan yang tinggi di Indonesia. Bersamaan dengan fenomena tersebut, terjadi sebuah masalah pada aspek lingkungan, yaitu polusi udara [2]. Kondisi tersebut berhubungan dengan penghasilan emisi karbon yang sangat tinggi di wilayah perkotaan.

Hal di atas perlu diantisipasi dan diimbangi dengan keberadaan ruang terbuka hijau (RTH). RTH yang sehat, teratur, dan memiliki manfaat ekologis, tergantung pada komposisi spesies, situasi, dan lokasi pertumbuhannya di wilayah perkotaan [2]–[4]. Kelurahan Darmo, Kecamatan Wonokromo merupakan salah satu wilayah di Kota Surabaya yang memiliki luasan RTH yang cukup besar dan terkelola oleh pemerintah daerah setempat, seperti Taman Bungkul, jalur hijau di Jalan Raya Darmo dan Jalan Diponegoro, dll. Berkaitan dengan kondisi tersebut, Kelurahan Darmo menjadi salah satu wilayah yang diperhatikan dalam optimalisasi fungsi RTH sebagai penyerap emisi karbon di Kota Surabaya.

Dugaan potensi penyerapan emisi karbon dapat diperoleh dengan akurat melalui metode penerapan secara langsung di lapangan (terrestrial), akan tetapi memerlukan waktu, sumber daya, dan biaya yang relatif tinggi [5]. Saat ini, terdapat alternatif solusi untuk mengetahui hal tersebut dalam cakupan wilayah yang luas, yaitu dengan metode aerial melalui teknologi penginderaan jauh. Dengan metode klasifikasi berbasis objek pada citra penginderaan jauh resolusi tinggi, spesies pohon yang beragam dan heterogenitasnya yang tinggi di wilayah perkotaan dapat diperoleh melalui informasi *spectral* pada citra. Hal ini dapat lebih ditingkatkan akurasi dengan menambahkan informasi struktural tiga dimensi (3D) dalam proses klasifikasi.

Wang dkk [6] menjelaskan bahwa penggunaan teknologi *light detection and ranging* (lidar) dapat mengatasi masalah kekurangan informasi struktural 3D dalam studi klasifikasi spesies pohon. Pada penelitian sebelumnya, ambang batas dalam proses segmentasi citra diperoleh dari model tinggi yang dihasilkan oleh data lidar, sehingga diperoleh akurasi dalam klasifikasi vegetasi di perkotaan sebesar 85,5% [7]. Penelitian lainnya yang terkait juga dilakukan menggunakan model tinggi yang diturunkan dari data lidar ke dalam klasifikasi berbasis objek di tingkat segmentasi, kemudian diproyeksikan ke citra *hyperspectral* untuk mengekstraksi



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

Tabel 1. Tingkat Kesesuaian Klasifikasi

Nilai KHAT (<i>Kappa</i>)	Tingkat Kesesuaian
$\bar{K} \leq 0,2$	Buruk
$0,2 < \bar{K} \leq 0,4$	Cukup
$0,4 < \bar{K} \leq 0,6$	Sedang
$0,6 < \bar{K} \leq 0,8$	Baik
$0,8 < \bar{K} \leq 1$	Sangat Baik

Tabel 2. Parameter Klasifikasi Semi-Otomatis pada *Point Clouds*

Kelas	Parameter	Nilai
Bangunan	Tinggi atap minimum	2 m
	Luas minimum	6 m ²
Vegetasi rendah	Tinggi maksimum	2 m
Vegetasi sedang	Tinggi maksimum	10 m
Vegetasi tinggi	Tinggi maksimum	50 m
<i>Overlap</i>	Jarak sampel	0,756 m
<i>Low/high noise</i>	Metode Evaluasi	<i>Isolation</i>

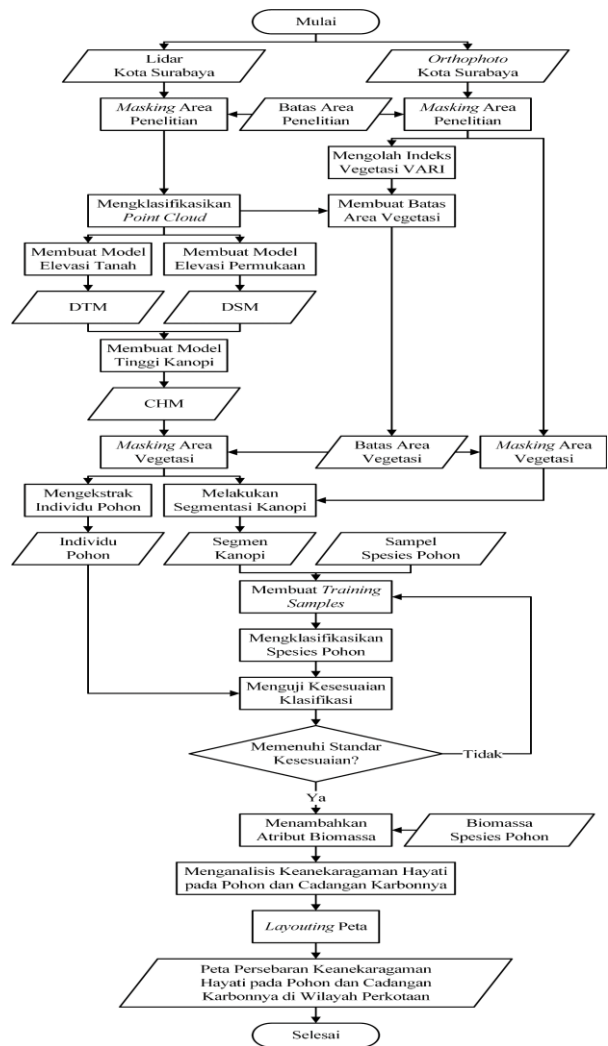
fitur *spectral*, sehingga diperoleh akurasi sebesar 88,9% [8]. Dengan begitu, kombinasi antara citra penginderaan jauh dan lidar perlu diterapkan untuk mendapatkan dugaan potensi penyerapan emisi karbon yang lebih akurat pada spesies pohon yang dikenal berbeda-beda dan tersebar tidak merata di wilayah perkotaan.

Oleh karena itu, penelitian ini ditujukan untuk mengetahui persebaran keanekaragaman hayati pada pohon dan potensinya dalam penyerapan emisi karbon di Kelurahan Darmo, Kecamatan Wonokromo, Kota Surabaya menggunakan data foto udara dan lidar. Dengan bantuan teknologi tersebut, diharapkan dapat memperoleh hasil yang lebih akurat untuk menduga potensi penyerapan emisi karbon pada pohon, khususnya di wilayah perkotaan. Selain itu, penelitian ini dapat dijadikan pertimbangan dalam pengelolaan RTH sebagai upaya pemerintah setempat meminimalkan dampak perubahan iklim, serta permasalahan lingkungan akibat fenomena urbanisasi, khususnya di Kota Surabaya.

II. URAIAN PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan di Kelurahan Darmo, Kecamatan Wonokromo, Kota Surabaya yang terletak di 7°16'28"-7°18'0" lintang selatan (LS) dan 112°43'34"-



Gambar 2. Diagram Alir Pengolahan Data.

112°44'34" bujur timur (BT). Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Data dan Peralatan

1) Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: daftar spesies pohon di Kota Surabaya tahun 2019; Orthophoto Kota Surabaya tahun 2016; Lidar Kota Surabaya tahun 2016; batas administrasi kelurahan di Kota Surabaya (RBI skala 1:25.000) tahun 2000; dan data diameter batang dan tinggi bebas cabang pada setiap spesies pohon di Kota Surabaya tahun 2014.

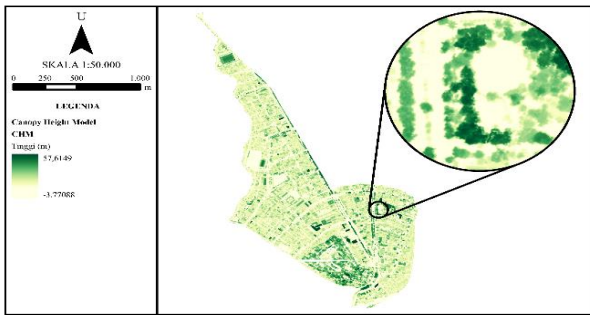
2) Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *global positioning system (GPS) handheld*; perangkat lunak: pengidentifikasi spesies pohon, pengolah sistem informasi geografis (SIG), pengolah data lidar, dan pengolah data statistik.

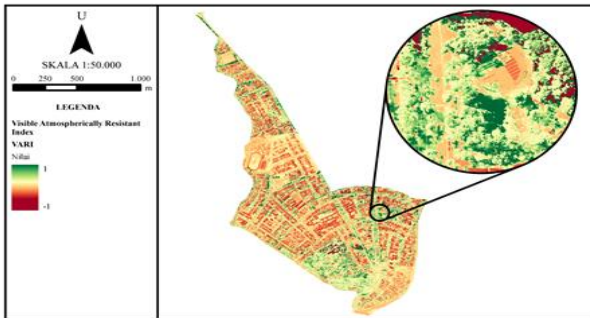
C. Tahapan Pengolahan Data

Adapun tahapan pengolahan data pada penelitian ini dijelaskan sebagai berikut dan dapat dilihat diagram alir pengolahan data pada Gambar 2.

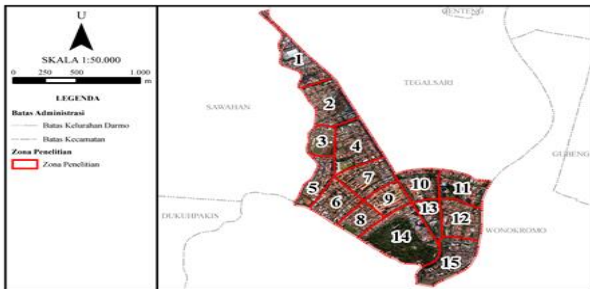
1. Mengklasifikasi *point clouds* pada data lidar secara semi-otomatis untuk menentukan kelas-kelas pada objek non-tanah (*non-ground*).



Gambar 3. Hasil Pembuatan CHM.



Gambar 4. Hasil Pengolahan VARI.



Gambar 5. Pembagian Zona Penelitian.

2. Mengonversikan data lidar menjadi *digital terrain model* (DTM) dan *digital surface model* (DSM) dengan teknik interpolasi *binning* dan metode *inverse distance weighted* (IDW) untuk menentukan nilai sel pada *raster*.
3. Membuat *canopy height model* (CHM) dengan Rujuk ke (1), sehingga diperoleh *raster* yang merepresentasikan tinggi pohon untuk digunakan menghitung biomassa [9].

$$CHM = DSM - DTM \quad (1)$$

4. Memotong area (*masking*) vegetasi pada data CHM dan *orthophoto*. Batas area vegetasi diperoleh dari irisan antara data kelas vegetasi pada data lidar dan data olahan nilai *vegetation atmospherically resistant index* (VARI) dengan Rujuk ke (2) yang berasal dari *orthophoto*.

$$VARI = \frac{G - R}{G + R - B} \quad (2)$$

Keterangan:

- R = nilai *pixel* dari kanal merah (*red band*)
- G = nilai *pixel* dari kanal hijau (*green band*)
- B = nilai *pixel* dari kanal biru (*blue band*)

5. Melakukan klasifikasi spesies pohon berdasarkan objek secara terbimbing (*supervised*). Metode klasifikasi tersebut menghasilkan unit dasar objek (*segmen*), bukan *pixel* tunggal seperti penerapan pada klasifikasi berbasis

Tabel 3. Parameter Segmentasi

Parameter	Nilai
Bobot	Red = 1 Green = 1 Blue = 1 CHM = 2
Skala	120
Bentuk	0,3
Kekompakan	0,2

Tabel 4. Luas Tutupan Kanopi Pohon di Kelurahan Darmo Berdasarkan Spesies

No	Nama Spesies	Luas (ha)	%SP*	%WP*
1	Albizia julibrissin	5,05	12,9%	3,1%
2	Cerbera manghas	2,34	6,0%	1,4%
3	Ficus benjamina	3,47	8,9%	2,1%
4	Plumeria rubra	1,47	3,8%	0,9%
5	Polyalthia longifolia	3,81	9,8%	2,3%
6	Pterocarpus indicus	4,56	11,7%	2,8%
7	Roystonea regia	3,33	8,5%	2,0%
8	Tamarindus indica	4,07	10,4%	2,5%
9	Terminalia catappa	2,10	5,4%	1,3%
10	Spesies Lainnya	8,84	22,6%	5,4%
Total		39,03	100%	23,7%

%SP – persentase terhadap seluruh kelas (spesies pohon)
%WP – persentase terhadap wilayah penelitian (Kelurahan Darmo)

Tabel 5. Jumlah Pohon di Kelurahan Darmo Berdasarkan Spesies

No	Nama Spesies	Jumlah	%
1	Albizia julibrissin	743	11,0%
2	Cerbera manghas	475	7,0%
3	Ficus benjamina	502	7,4%
4	Plumeria rubra	324	4,8%
5	Polyalthia longifolia	779	11,5%
6	Pterocarpus indicus	913	13,5%
7	Roystonea regia	614	9,1%
8	Tamarindus indica	754	11,1%
9	Terminalia catappa	325	4,8%
10	Spesies Lainnya	1.349	19,9%
Total		6.778	100,0%

6. Mengekstrak individu pohon menggunakan algoritma *local maxima* pada data CHM. Kemudian data tersebut ditampilkan dengan tutupan kanopi pohon yang terklasifikasi, sehingga setiap individu pohon memiliki atribut spesies.
7. Menguji kesesuaian klasifikasi melalui analisis *kappa* dengan cara membandingkan data hasil klasifikasi dengan data referensi yang diperoleh dari pengamatan melalui *Google Street View*. Tingkat kesesuaian klasifikasi ditunjukkan pada Tabel 1 [11].
8. Menganalisis persebaran keanekaragaman hayati pada pohon, meliputi: tingkat dominansi suatu spesies pohon dalam suatu komunitas vegetasi melalui metode analisis dominansi vegetasi; dan pola persebarannya menggunakan metode *average nearest neighbor*.

Tabel 6.
Hasil Analisis Dominansi Vegetasi di Kelurahan Darmo

No	Spesies	KR	FR	DR	INP
1	<i>Albizia julibrissin</i>	13,7%	11,4%	16,7%	0,42
2	<i>Cerbera manghas</i>	8,7%	11,4%	7,8%	0,28
3	<i>Ficus benjamina</i>	9,2%	11,4%	11,5%	0,32
4	<i>Plumeria rubra</i>	6,0%	11,4%	4,9%	0,22
5	<i>Polyalthia longifolia</i>	14,3%	11,4%	12,6%	0,38
6	<i>Pterocarpus indicus</i>	16,8%	9,1%	15,1%	0,41
7	<i>Roystonea regia</i>	11,3%	11,4%	11,0%	0,34
8	<i>Tamarindus indica</i>	13,9%	11,4%	13,5%	0,39
9	<i>Terminalia catappa</i>	6,0%	11,4%	6,9%	0,24
Total		100%	100%	100%	3,00

Tabel 7.
Pola Persebaran Spesies Pohon di Kelurahan Darmo

No	Nama Spesies	Kelas							Total
		1	2	3	4	5	6	7	
1	<i>Albizia julibrissin</i>	15	0	0	0	0	0	0	15
2	<i>Cerbera manghas</i>	10	3	0	2	0	0	0	15
3	<i>Ficus benjamina</i>	13	0	0	2	0	0	0	15
4	<i>Plumeria rubra</i>	9	1	0	4	0	0	1	15
5	<i>Polyalthia longifolia</i>	13	0	1	0	0	1	0	15
6	<i>Pterocarpus indicus</i>	12	0	0	0	0	0	0	12
7	<i>Roystonea regia</i>	10	2	0	3	0	0	0	15
8	<i>Tamarindus indica</i>	13	1	0	0	0	0	0	14
9	<i>Terminalia catappa</i>	9	0	1	3	1	0	0	14
Total		104	7	2	14	1	1	1	130
Persentase (%)		80,0	5,4	1,5	10,8	0,8	0,8	0,8	100

9. Menghitung biomassa pohon berdasarkan geometrik volume dengan Rujuk ke (3)–(4) [12].

$$V = \frac{1}{4} \pi \times \left(\frac{D}{100}\right)^2 \times H \times F \quad (3)$$

Keterangan:

- V = volume pohon (m^3)
- π = dinyatakan dalam nilai standar 3,14
- D = diameter pohon setinggi dada (cm)
- H = tinggi bebas cabang pohon (m)
- F = faktor koreksi (0,6)

$$B_T = \frac{\sum(\rho \times V) \times BEF_T}{L} \quad (4)$$

Keterangan:

- B_T = kepadatan biomassa tegakan (kg per m^2)
- ρ = massa jenis kayu (kg per m^3)
- V = volume pohon (m^3)
- BEF_T = *biomass expansion factor* tegakan (1,74)
- L = luas areal (m^2)

10. Mengonversikan biomassa menjadi cadangan karbon dan daya serap emisi CO_2 dengan Rujuk ke (5)–(6) [12].

$$C = F \times B \quad (5)$$

Keterangan:

- C = cadangan karbon pohon (ton C)
- F = fraksi karbon (47%)
- B = biomassa pohon (ton)

$$CO_2eq = \frac{Mr_{CO_2}}{Ar_C} \times C \quad (6)$$

Keterangan:

- CO_2eq = karbon dioksida ekuivalen pohon (ton CO_2)
- Mr_{CO_2} = massa molekul terlatif CO_2 (44)
- Ar_C = massa atom relatif C (12)
- C = cadangan karbon pohon (ton C)

11. Membuat peta persebaran keanekaragaman hayati pada pohon dan cadangan karbonnya di perkotaan.

III. PETUNJUK TAMBAHAN

A. Gambar dan Tabel

Data mentah lidar memiliki kelas tanah dan non-tanah. Dengan menggunakan metode pengolahan semi-otomatis, klasifikasi dilakukan untuk menentukan kelas objek bangunan, vegetasi, *noise*, dan *overlap* pada kelas *non-ground*. Proses ini menghasilkan kelas-kelas tersebut melalui parameter dengan nilai yang ditentukan sebagaimana dijabarkan pada Tabel 2.

B. Membuat Canopy Height Model

CHM diperoleh dari hasil kalkulasi selisih nilai *raster DSM* dan *DTM*. *DTM* berasal dari hasil interpolasi *last return* pada kelas tanah *point clouds*, sedangkan *DSM* berasal dari hasil interpolasi *first return* pada semua kelas *point clouds*. Luaran CHM dapat dilihat pada Gambar 3. Nilai pada CHM merupakan tinggi objek di atas permukaan tanah.

C. Pemotongan Area Vegetasi

Batas area vegetasi diperoleh dari irisan antara kelas vegetasi yang memiliki tinggi ≥ 2 m pada data lidar dan hasil olahan nilai *vegetation atmospherically resistant index (VARI)* yang berasal dari data *orthophoto*. Pada Gambar 4,

Tabel 8.
Cadangan Karbon dan Daya Serap CO₂ Individu Pohon Berdasarkan Spesies

No	Nama Spesies	ρ (kg/m ³)	\bar{V} (m ³)	B_T (ton/ha)	\bar{B} (ton)	\bar{C} (ton)	\bar{CO}_2eq (ton)
1	Albizia julibrissin	490	0,264	1,015	0,225	0,1059	0,388
2	Cerbera manghas	380	0,014	0,027	0,009	0,0043	0,016
3	Ficus benjamina	420	0,192	0,427	0,140	0,0659	0,242
4	Plumeria rubra	500	0,009	0,015	0,008	0,0037	0,013
5	Polyalthia longifolia	540	0,088	0,390	0,083	0,0388	0,142
6	Pterocarpus indicus	620	0,265	1,580	0,285	0,1342	0,492
7	Roystonea regia	700	0,090	0,410	0,110	0,0518	0,190
8	Tamarindus indica	930	0,061	0,452	0,099	0,0465	0,171
9	Terminalia catappa	460	0,034	0,054	0,027	0,128	0,047
	Rata-rata	560	0,113	0,486	0,110	0,052	0,189

Tabel 9.
Estimasi Cadangan Karbon dan Daya Serap CO₂ di Kelurahan Darmo Berdasarkan Spesies

No	Spesies	C (ton)	CO ₂ eq (ton)
1	Albizia julibrissin	78,7	288,5
2	Cerbera manghas	50,3	184,4
3	Ficus benjamina	53,2	194,9
4	Plumeria rubra	34,3	125,8
5	Polyalthia longifolia	82,5	302,4
6	Pterocarpus indicus	96,7	354,5
7	Roystonea regia	65,0	238,4
8	Tamarindus indica	79,8	292,7
9	Terminalia catappa	34,4	126,2
	Total	574,8	2107,7

ditunjukkan hasil pengolahan VARI yang memiliki rentang nilai -1 sampai 1, di mana diasumsikan nilai yang lebih dari 0 memiliki tingkat kehijauan yang dibutuhkan untuk menentukan area vegetasi.

D. Klasifikasi Spesies Pohon Berbasis Objek

Segmentasi merupakan awal proses klasifikasi untuk mengelompokkan *pixel* yang berdekatan dengan nilai atribut yang sama. Dalam hal ini, segmentasi dilakukan pada sebuah *raster* dengan kombinasi warna RGB yang berasal dari *orthophoto* dan nilai tinggi pohon yang berasal dari CHM, menggunakan parameter yang ditampilkan pada Tabel 3.

Proses klasifikasi terbimbing (*supervised*) dilakukan dengan *training samples* yang terdiri dari 9 kelas spesies pohon yang teridentifikasi di lapangan, serta kelas spesies lainnya yang tidak teridentifikasi. Hasil klasifikasi dapat dilihat pada di mana seluas 39,03 ha kanopi pohon menutupi Kelurahan Darmo yang memiliki luas 164,89 ha. Kelas *Albizia julibrissin* menempati urutan pertama sebagai spesies teridentifikasi yang memiliki tutupan kanopi pohon terluas, yaitu sebesar 5,05 ha. Di sisi lain, urutan terakhir ditempati oleh kelas *Plumeria rubra* dengan luas tutupan kanopi sebesar 1,47 ha.

E. Ekstraksi Individu Pohon

Ekstraksi individu pohon pada data CHM dilakukan menggunakan *focal flow tool* pada perangkat lunak *ArcGIS Pro*. *Tool* tersebut memberikan hasil nilai sel yang lebih rendah untuk elevasi yang lebih tinggi di antara sel berdekatan berukuran 3×3. Oleh karena itu, puncak kanopi pohon yang bernilai paling rendah yaitu 0 (nol) diasumsikan sebagai individu pohon yang memiliki batangnya tersendiri.

Pada Tabel 5, ditampilkan jumlah pohon yang dihasilkan berdasarkan spesiesnya, setelah dilakukan penampalan terhadap hasil klasifikasi spesies pohon. Sejumlah 6.778 pohon berada di Kelurahan Darmo. *Pterocarpus indicus* merupakan spesies pohon yang paling banyak menempati Kelurahan Darmo, yaitu sejumlah 913 pohon atau persentase 13,5% dari keseluruhan. *Plumeria rubra* menempati urutan paling bawah dengan hanya berjumlah 324 pohon atau 4,8% dari keseluruhan.

F. Uji Kesesuaian Klasifikasi

Validasi dilakukan terhadap titik individu pohon yang memiliki atribut spesies pohon. Hal ini diterapkan dengan cara mengamati kebenarannya melalui *Google Street View*. Sebanyak 234 sampel dijadikan titik uji berdasarkan distribusi *multinomial* [13]. Dalam proses pengamatan, waktu akuisisi citra pada *Google Street View* disesuaikan yang paling mendekati bulan November 2016.

Uji kesesuaian klasifikasi berbasis objek berdasarkan analisis kappa melalui matriks kesalahan, diperoleh nilai KHAT sebesar 0,64. Nilai tersebut menandakan bahwa tingkat kesesuaian klasifikasi dianggap sudah baik. Beberapa kesalahan klasifikasi sering terjadi ketika ada bayangan maupun kecerahan karena pengaruh posisi sinar matahari pada saat akuisisi foto udara, sehingga dari segi warna kurang merepresentasikan spesies pohon tersebut. Begitu pula pohon-pohon yang memiliki tutupan kanopi kecil, seperti pohon palem, seringkali ikut serta dalam segmen kanopi yang lebih besar di sebelahnya.

G. Dominansi Spesies Pohon

Tingkat dominansi suatu spesies pohon dalam suatu komunitas vegetasi diperoleh dari hasil analisis dominansi vegetasi berwujud indeks nilai penting (INP). INP diperoleh dari akumulasi kerapatan relatif (KR), frekuensi relatif (FR), dan dominansi relatif (DR). Hasil analisis dominansi vegetasi ditampilkan pada Tabel 6. Pada tabel tersebut, ditunjukkan bahwa *Albizia julibrissin* merupakan spesies pohon yang mendominasi di Kelurahan Darmo dengan INP sebesar 0,42. Di sisi lain, *Plumeria rubra* menempati posisi terendah di antara 8 spesies lainnya dengan perolehan INP sebesar 0,22.

H. Pola Persebaran Spesies Pohon

Analisis pola persebaran pohon pada setiap spesiesnya dilakukan dengan teknik *average nearest neighbor* yang ditujukan kepada setiap spesies pohon pada zona yang telah ditentukan (lihat Gambar 5). Kelas dalam rentang 1–7 dibuat dengan keterangan pola yang sangat menggerombol, acak, hingga sangat menyebar secara berurutan. Klasifikasi tersebut didasari oleh tingkat kepercayaan berdasarkan standar deviasi (*z*) dan probabilitas (ρ). Berdasarkan perhitungan yang ditampilkan hasilnya pada Tabel 7, masing-masing spesies pohon di 15 zona wilayah yang berbeda

memiliki pola persebaran yang dominan sangat menggerombol. Hal tersebut dibuktikan dengan persentase 80,0% atau 104 dari 130 sampel zona per spesies dikategorikan sebagai kelas 1, yaitu sangat menggerombol.

I. Cadangan Karbon dan Daya Serap CO₂ Pohon

Data rata-rata diameter batang dan tinggi bebas cabang setiap spesies pohon menentukan kuantitas biomassa melalui Rujuk ke (3)–(4). Hal tersebut diperoleh setelah mengetahui jumlah pohon dan massa jenis kayu (ρ) berdasarkan *open source database* ICRAF pada masing-masing spesiesnya di wilayah penelitian. Kepadatan biomassa tegakan (B_T) kemudian dibagi berdasarkan luas wilayah penelitian terhadap masing-masing spesies pohon, sehingga mendapatkan kuantitas rata-rata biomassa (\bar{B}) individu pohon setiap spesiesnya. Konversi biomassa tersebut ke cadangan karbon (\bar{C}) dan daya serap CO₂ (\bar{CO}_2eq) dilakukan melalui Rujuk ke (5)–(6).

Tabel 8 yang merupakan hasil perhitungan di atas, menerangkan bahwa *Pterocarpus indicus* memiliki rata-rata kandungan cadangan karbon dan kemampuan daya serap CO₂ terbesar di antara 8 spesies lainnya yang teridentifikasi dengan masing-masing sebesar 0,1342 ton C dan 0,492 ton CO₂. Sementara itu, *Plumeria rubra* menjadi spesies pohon teridentifikasi yang memiliki kandungan cadangan karbon paling sedikit di antara 8 spesies lainnya, yaitu sebesar 0,0037 ton C, serta kemampuan daya serap CO₂ yang hanya sebesar 0,013 ton CO₂.

Estimasi cadangan karbon dan kemampuan pohon dalam menyerap emisi CO₂ di Kelurahan Darmo masing-masing sebesar 574,8 ton C dan 2107,7 ton CO₂. Secara terperinci, estimasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 9. Berdasarkan tabel di atas, diketahui bahwa *Pterocarpus indicus* merupakan spesies pohon yang menyumbang akumulasi cadangan karbon dan daya serap emisi CO₂ terbesar di Kelurahan Darmo yaitu masing-masing sebesar 96,7 ton C dan 354,5 ton CO₂, sedangkan *Plumeria rubra* sebaliknya selaku penyumbang paling sedikit yaitu hanya masing-masing sebesar 34,3 ton C dan 125,8 CO₂.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini; (1) Klasifikasi spesies pohon di wilayah perkotaan dilakukan dengan metode klasifikasi berbasis objek menggunakan foto udara yang mengandung informasi *spectral* serta lidar yang mengandung informasi struktural berupa tinggi pohon. Tingkat kesesuaian klasifikasi tersebut diperoleh akurasi kappa sebesar 0,64. Hasil tersebut menandakan bahwa hasil klasifikasi dianggap baik; (2) Beberapa pohon yang teridentifikasi di Kelurahan Darmo, Kota Surabaya masing-masing memiliki frekuensi sebagai berikut: *Albizia julibrissin* berjumlah 743 pohon; *Cerbera manghas* berjumlah 475 pohon; *Ficus benjamina* berjumlah 502 pohon; *Plumeria rubra* berjumlah 324 pohon; *Polyalthia longifolia* berjumlah 779 pohon; *Pterocarpus indicus* berjumlah 913 pohon; *Roystonea regia* berjumlah 614 pohon; *Tamarindus indica* berjumlah 754 pohon; dan *Terminalia catappa* berjumlah 325 pohon. Dari berbagai spesies pohon tersebut, *Albizia julibrissin* merupakan spesies pohon yang mendominasi di

Kelurahan Darmo yang memiliki Indeks Nilai Penting (INP) sebesar 0,42 dari hasil analisis dominansi vegetasi. Adapun pola persebaran pohon di Kelurahan Darmo, Kota Surabaya cenderung menggerombol. Hal tersebut didasari oleh perhitungan *average nearest neighbor*, diketahui bahwa 80,0% atau 104 dari 130 sampel zona per spesies dikategorikan sebagai kelas sangat menggerombol. Berdasarkan 9 spesies pohon teridentifikasi, Kelurahan Darmo, Kota Surabaya memiliki cadangan karbon sejumlah 574,8 ton C dengan kepadatan 3,5 ton C per hektar. *Pterocarpus indicus* merupakan spesies pohon yang berpengaruh besar sebagai penyimpan cadangan karbon di kelurahan tersebut dengan akumulasi sejumlah 96,7 ton C atau 16,8%. Begitu pula jika dikaitkan dengan kasus serapan dan emisi gas rumah kaca, kuantitas cadangan karbon yang ada di Kelurahan Darmo, Kota Surabaya setara dengan 2.107,7 ton CO₂, yang artinya sejumlah tersebut merupakan serapan emisi karbon dioksida ekuivalen (CO₂-eq) atas kemampuan 9 spesies pohon teridentifikasi di kelurahan tersebut.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis F.A.Y. mengucapkan terima kasih kepada Dinas Perumahan Rakyat dan Kawasan Permukiman, Cipta Karya dan Tata Ruang, Pemerintah Kota Surabaya yang telah menyediakan data spasial utama penelitian ini berupa *orthophoto* dan lidar wilayah Kota Surabaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] UN, *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. New York, US: United Nations, 2015.
- [2] F. J. Escobedo dan D. J. Nowak, "Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 90, no. 3–4, hal. 102–110, 2009, doi: 10.1016/j.landurbplan.2008.10.021.
- [3] W. J. Manning, "Plants in urban ecosystems: essential role of urban forests in urban metabolism and succession toward sustainability," *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 15, no. 4, hal. 362–370, Agu 2008, doi: 10.3843/SusDev.15.4:12.
- [4] H. R. McCarthy dan D. E. Pataki, "Drivers of variability in water use of native and non-native urban trees in the greater los angeles area," *Urban Ecosyst.*, vol. 13, no. 4, hal. 393–414, 2010, doi: 10.1007/s11252-010-0127-6.
- [5] D. Lu, "The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 27, no. 7, hal. 1297–1328, 2006, doi: 10.1080/01431160500486732.
- [6] K. Wang, T. Wang, dan X. Liu, "A review: individual tree species classification using integrated airborne lidar and optical imagery with a focus on the urban environment," *Forests*, vol. 10, no. 1, 2019, doi: 10.3390/f10010001.
- [7] J. Tigges, T. Lakes, dan P. Hostert, "Urban vegetation classification: benefits of multitemporal rapid-eye satellite data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 136, hal. 66–75, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.001.
- [8] Z. Zhang, A. Kazakova, L. M. Moskal, dan D. M. Styers, "Object-based tree species classification in urban ecosystems using lidar and hyperspectral data," *Forests*, vol. 7, no. 6, hal. 1–16, 2016, doi: 10.3390/f7060122.
- [9] E. Hart dan L. Wasser, "Create a canopy height model from lidar-derived rasters in r," *neon science*, 2017. https://www.neonscience.org/create-chm-rasters-r (diakses Okt 09, 2019).
- [10] T. Blaschke, "Object based image analysis for remote sensing," *isprs j. photogramm. remote sens.*, vol. 65, no. 1, hal. 2–16, 2010, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004.
- [11] J. R. Landis dan G. G. Koch, "The measurement of observer agreement for categorical data," *Biometrics*, vol. 33, no. 1, hal. 159–174, 1977, doi: 10.2307/2529310.
- [12] Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, *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, Kementerian Kehutanan Republik Indonesia, 2013.
- [13] R. G. Congalton dan K. Green, *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, 2 ed. Boca Raston, Florida: CRC Press, 2009.
- [14] Esri, "How Average Nearest Neighbor Works," *Tool Reference ArcGIS Pro*, 2015. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/h-how-average-nearest-neighbor-distance-spatial-st.htm> (diakses Apr 30, 2020).