

## Serapan Karbon Ekosistem Pada Wilayah Perkotaan Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

Munawar Cholil<sup>1</sup>, Danardono<sup>1\*</sup>, M. Iqbal Taufiqurrahman Sunariya<sup>1</sup>, Vidya Nahdiyatul Fikriyah<sup>1</sup>,  
Muhammad Abdul Latief<sup>1</sup>, Kartika Cindi Wulandari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Geografi, Universitas Muhammadiyah Surakarta

\*Email: danardono @ums.ac.id

### Abstrak

**Keywords:**

*Karbon, Net Primary  
Productivity,  
Perkotaan, Surakarta*

Nilai serapan karbon ekosistem di kawasan perkotaan jarang diteliti karena kurangnya vegetasi sebagai media penyerap karbon. Padahal kawasan perkotaan memiliki tingkat emisi karbon tinggi yang harus diminimalkan jumlahnya. Di sisi lain, nilai serapan karbon di kawasan perkotaan sangatlah dinamis akibat adanya faktor alami dari lingkungan dan faktor non-alami akibat aktivitas antropogenik. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengidentifikasi nilai serapan karbondioksida di kawasan perkotaan dan untuk mengetahui variasi spasial nilai serapan karbon di kawasan perkotaan selama setahun. Hasil menunjukkan bahwa nilai serapan karbon di kawasan perkotaan tropis memiliki nilai yang cukup besar dibandingkan kawasan perkotaan di iklim sedang. Hal ini terjadi karena masih adanya ruang terbuka hijau berupa kebun di lahan pekarangan dan lahan pertanian.

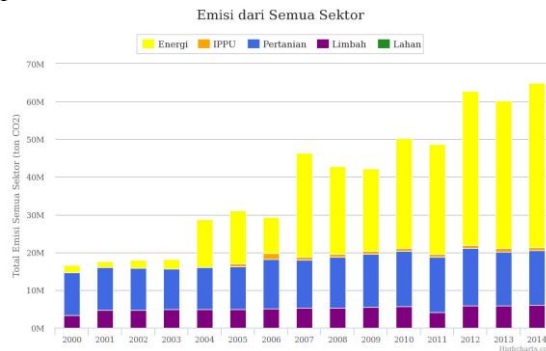
### 1. PENDAHULUAN

Pengurangan emisi karbon di atmosfer untuk mengurangi resiko perubahan iklim menjadi salah satu fokus utama bahasan di tingkat global sampai regional. Salah satu agenda besar di tingkat global yang fokus membahas perubahan iklim melalui IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) yaitu dengan mengurangi besaran emisi karbon di atmosfer. Beberapa rumusan strategi yang digagas seperti program REDD+, mekanisme carbon trade dan carbon fund (1,2). Sebagai negara yang ikut serta dalam konferensi tersebut, Indonesia juga memiliki komitmen besar dalam rangka mengurangi emisi karbon. Salah satu bentuk komitmen tersebut tertuang dalam regulasi pemerintah mengenai Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca.

Dokumen tersebut berisi mengenai komitmen Negara Indonesia untuk mengurangi emisi karbondioksida sebesar 26% secara mandiri dan 41% dengan bantuan pihak lain. Regulasi tersebut juga memberikan mandat langsung kepada wilayah administrasi di bawah Negara Indonesia untuk melaksanakan secara regional guna mendukung pencapaian target pengurangan emisi nasional.

Adanya regulasi tersebut mengikat pada semua wilayah baik pada wilayah dengan kawasan perkotaan maupun perdesaan. Hal ini menjadi problem utamanya di wilayah dengan dominan kawasan perkotaan seperti di Kota Surakarta. Wilayah Kota Surakarta yang hampir 80% wilayahnya didominasi berupa lahan terbangun untuk industri dan permukiman memiliki tren peningkatan

emisi karbondioksida dari tahun ke tahun (Gambar 1.1.). Tren peningkatan emisi karbondioksida dipicu oleh adanya pemanfaatan kendaraan bermotor dan aktivitas industri yang membuang sejumlah karbondioksida ke atmosfer. Oleh karena itu, perlu upaya konkret untuk mengurangi emisi karbon di kawasan perkotaan.



**Gambar 1.1.** Tren Peningkatan Emisi Karbondioksida di Kota Surakarta (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Indonesia, 2016)

Langkah awal yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi karbon yaitu dengan melakukan inventarisasi potensi simpanan karbon wilayah. Sampai saat ini, inventarisasi simpanan karbon yang digunakan dan dihitung yaitu simpanan karbon vegetasi pada kawasan hutan (3,4). Hal ini menjadi problem bagi kawasan perkotaan seperti di Kota Surakarta yang hanya memiliki luasan lahan bervegetasi sempit. Luasan lahan bervegetasi yang sempit hanya akan menghasilkan potensi simpanan karbon yang kecil karena estimasi potensi simpanan karbon dihitung per satuan jenis vegetasi. Selain itu, estimasi potensi simpanan karbon vegetasi ini hanya menggambarkan potensi statis yang tidak berubah menurut waktu akibat adanya perubahan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, perlu adanya perhitungan yang lebih peka untuk mengestimasi serapan karbon dalam lahan vegetasi sempit dan dinamis menurut perubahan lingkungan. Perhitungan serapan karbon dinamis diharapkan dapat memberikan gambaran potensi serapan karbon di suatu wilayah per satuan waktu tertentu.

Serapan karbon dinamis dapat dimodelkan dengan mengestimasi nilai produktivitas ekosistem. Produktivitas ekosistem dapat menggambarkan fluks karbon antara ekosistem terestrial dan atmosfer melalui proses fotosintesis dan respirasi vegetasi. Fotosintesis dapat digunakan untuk mengetahui kemampuan suatu ekosistem bervegetasi untuk menyerap karbon dari atmosfer (5–7). Sementara, respirasi digunakan untuk mengetahui perpindahan karbon dari ekosistem bervegetasi kembali ke atmosfer (8–10). Pemodelan produktivitas ekosistem untuk estimasi serapan karbon dinamis telah banyak dikembangkan utamanya dengan memanfaatkan data penginderaan jauh. Beberapa model yang telah dikembangkan seperti Carnegie–Ames–Stanford Approach (CASA) (11), GLOBAL Production Efficiency Model atau GLO-PEM (12), GLO-PEM 2 (13) dan Vegetation Photosynthesis Model (VPM) (14). Model tersebut pada dasarnya terbagi menjadi tiga kerangka teori utama yaitu (1) Nilai Net Primary Productivity (NPP) yang berhubungan dengan besaran energi matahari yang diserap oleh vegetasi atau disebut Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR); (2) APAR dan FPAR (Fraction Absorbed Photosynthetically Active Radiation) yang dapat diestimasi dari data penginderaan jauh dengan model vegetasi seperti spectral vegetation indices (SVI), normalized difference vegetation index (NDVI) dan simple ratio (SR); dan (3) konversi aktual dari APAR ke karbon yakni maksimum light use efficiency (LUE) yang disebabkan oleh dinamika biofisika (15,16).

Kesemua model tersebut sering diterapkan pada wilayah bervegetasi lebat seperti kawasan hutan baik lindung atau produksi untuk mengestimasi nilai potensi serapan karbon dinamis dari vegetasi (17). Masih jarang penelitian estimasi serapan karbon dengan menggunakan model produktivitas ekosistem dilakukan pada wilayah bervegetasi jarang utamanya pada kawasan perkotaan dengan dominasi lahan terbangun (17,18). Penelitian ini mencoba melakukan estimasi produktivitas

ekosistem dengan menggunakan model CASA pada kawasan perkotaan di Kota Surakarta. Hal ini dapat dilakukan untuk mengetahui potensi serapan karbon pada kawasan ruang terbuka hijau yang cukup sempit di kawasan perkotaan. Hal ini dapat memudahkan dalam perencanaan tata guna lahan sebagai upaya pengurangan emisi karbon di atmosfer di kawasan perkotaan. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui variasi spasiotemporal produktivitas ekosistem dan serapan karbondioksida pada kawasan perkotaan tepatnya di Kota Surakarta, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia.

## 2. METODE

### 2.1. Metode Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri dari data indeks kehijauan (NDVI) bulanan (Januari sampai Desember) tahun 2019, data iklim bulanan 10 tahun terakhir (2008 – 2019) yang terdiri dari data curah hujan, suhu, kelembaban relatif, dan radiasi penyinaran matahari, dan datautupan lahan Kota Surakarta tahun 2019. Data indeks kehijauan (NDVI) diperoleh dengan pemodelan dengan menggunakan citra Sentinel 2A. Citra Sentinel 2A yang digunakan yaitu citra Sentinel Bulan Januari sampai Desember Tahun 2019 disediakan oleh ESA Copernicus melalui website <https://scihub.copernicus.eu/>. Sebelum digunakan untuk pemodelan, dilakukan koreksi geometrik dan radiometrik pada citra Sentinel 2A. Citra hasil koreksi digunakan untuk memodelkan indeks vegetasi (NDVI) dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) \dots (1)$$

Selanjutnya data iklim bulanan dari Tahun 2008 sampai 2019 di dapatkan dari data klimatologi stasiun cuaca Badan Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Indonesia dan data yang dikeluarkan oleh NASA melalui website <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Datautupan lahan Kota Surakarta

Tahun 2019 di dapatkan dari Badan Informasi Geospasial melalui website Inageoportal (<https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web>) yang kemudian di detailkan dengan menggunakan citra satelit yang dikeluarkan oleh Google Earth Tahun 2019 di wilayah penelitian. Pembaruan datautupan lahan dilakukan dengan teknik interpretasi dan digitasi secara langsung pada citra. Datautupan lahan yang dimanfaatkan dalam penelitian yaitu datautupan vegetasi di Kota Surakarta untuk memodelkan nilai serapan karbon dari proses fotosintesis.

### 2.2. Metode Pengolahan dan Analisis Data

Nilai serapan karbon di wilayah penelitian dimodelkan dengan menggunakan analisis Net Primary Productivity (NPP) untuk mengetahui produktivitas bersih yang dihasilkan oleh vegetasi selama proses fotosintesis. Nilai NPP dapat digunakan untuk menghitung besarnya karbondioksida yang terserap oleh vegetasi selama proses fotosintesis berlangsung. Nilai NPP dapat dihitung dengan menggunakan metode yang dikembangkan oleh Carnegie–Ames–Stanford Approach (CASA). Metode CASA dilakukan untuk mengestimasi produktivitas ekosistem melalui proses fotosintesis. NPP dihitung dengan memanfaatkan citra penginderaan jauh multispektral dan data parameter iklim (suhu, kelembaban, radiasi matahari, evaporasi, dan curah hujan) selama minimal satu tahun.

Selanjutnya nilai serapan karbon hasil model NPP dalam bentuk karbon tunggal dapat diubah menjadi bentuk karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dengan rumus sebagai berikut.

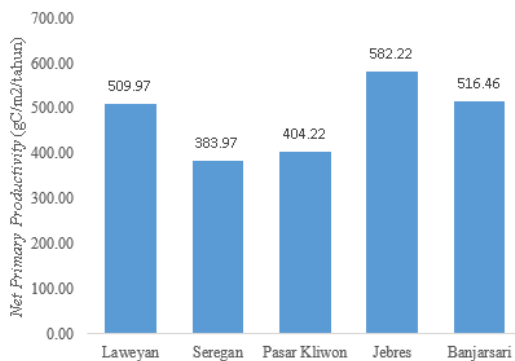
$$\text{Serapan CO}_2 = NPP \times (44 \text{ gCO}_2/12 \text{ gC})$$

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Hasil

Nilai serapan karbon pada suatu wilayah dimodelkan dengan menggunakan nilai produktivitas bersih melalui proses fotosintesis yang dikenal dengan net primary productivity (NPP).

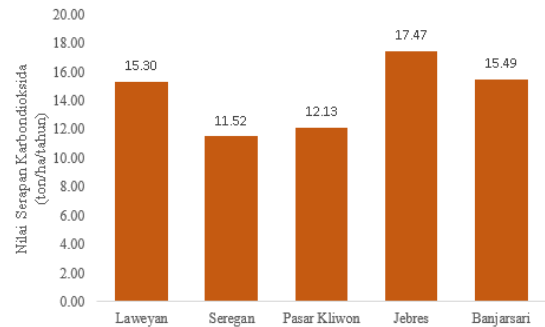
NPP menggambarkan besarnya energi radiasi matahari yang dikonversi oleh vegetasi menjadi energi kimiawi untuk menghasilkan bahan makanan bagi vegetasi tersebut. Proses tersebut membutuhkan sejumlah karbon yang diserap dari atmosfer di sekitar vegetasi tersebut. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa nilai rata-rata produktivitas bersih (NPP) tahunan di Kota Surakarta sebesar 479,37 gC/m<sup>2</sup>/tahun. Nilai rata-rata NPP tahunan tertinggi di Kota Surakarta terdapat pada wilayah Kecamatan Jebres dengan nilai sebesar 582,22 gC/m<sup>2</sup>/tahun, sedangkan nilai terendah terdapat pada wilayah Kecamatan Seregan sebesar 382,97 gC/m<sup>2</sup>/tahun. Nilai rata-rata tahunan NPP per kecamatan di Kota Surakarta dapat dilihat pada gambar 3.1.



**Gambar 3.1.** Nilai Rata-rata Tahunan Net Primary Productivity di Kota Surakarta

Berdasarkan nilai pemodelan NPP dapat dihitung nilai serapan karbondioksida di wilayah penelitian. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata nilai serapan karbondioksida di Kota Surakarta sebesar 14,38 ton/ha/tahun. Sama halnya dengan nilai NPP, nilai rata-rata serapan karbondioksida terbesar terdapat pada wilayah Kecamatan Jebres sebesar 17,47 ton/ha/tahun, sedangkan nilai terendah terdapat pada wilayah Kecamatan Seregan sebesar 11,52 ton/ha/tahun. Besaran nilai rata-rata serapan karbondioksida tahunan per Kecamatan di Kota Surakarta tersaji pada Gambar 3.2.

Nilai NPP dan potensi serapan karbondioksida di Kota Surakarta membentuk pola spasial yang khas. Nilai NPP dan serapan karbondioksida di bagian tengah wilayah penelitian memiliki nilai yang sangat rendah bahkan mendekati angka 0. Sementara, sebaran nilai NPP dan serapan karbondioksida tertinggi terdapat pada wilayah pinggiran Kota Surakarta yang berbatasan dengan kabupaten atau kota lain. Nilai NPP dan serapan karbondioksida tinggi tersebar di bagian utara dan memanjang ke arah barat sepanjang wilayah Kecamatan Jebres, Banjarsari, dan Laweyan. Wilayah tersebut merupakan perbatasan Kota Surakarta dengan wilayah Kabupaten Boyolali dan Karanganyar.

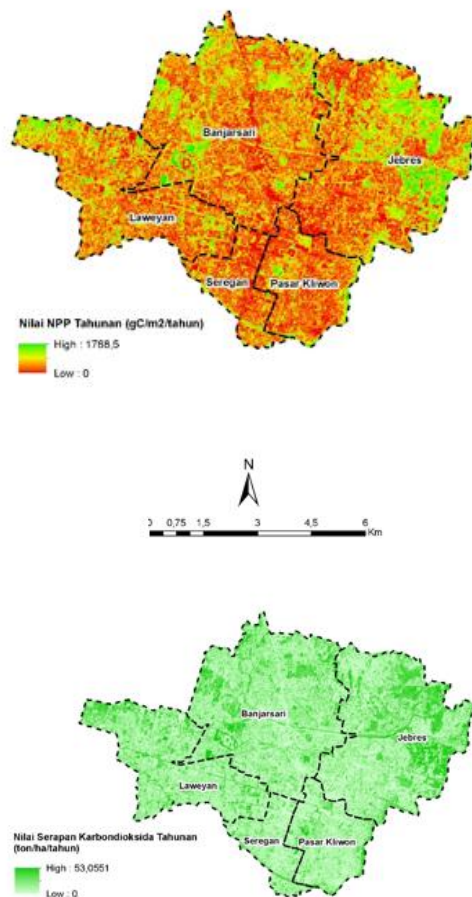


**Gambar 3.2.** Nilai Rata-rata Tahunan Serapan Karbondioksida di Kota Surakarta

Apabila diperhatikan, pola spasial nilai NPP dan serapan karbondioksida ini mengikuti pola tutupan lahan. Nilai NPP dan serapan karbondioksida tinggi yang terdapat di batas Kota Surakarta sisi barat dan utara disebabkan karena adanya lahan pertanian irigasi. Sementara di sisi timur memanjang dari utara ke selatan (wilayah Kecamatan Pasar Kliwon dan Banjarsari) juga memiliki nilai NPP dan serapan karbondioksida tinggi. Daerah tersebut merupakan kawasan sempadan Sungai Bengawan Solo yang di sisi kanan dan kirinya masih ditumbuhi oleh vegetasi. Sementara nilai NPP dan serapan karbondioksida tinggi di sisi bagian tengah Kota Surakarta merupakan kawasan taman kota yang sengaja diperuntukan untuk ruang terbuka hijau publik. Pola spasial nilai NPP dan

serapan karbondioksida di Kota Surakarta secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.3.

Selanjutnya, nilai rata-rata serapan karbondioksida dapat digunakan untuk mengetahui potensi ekosistem di Kota Surakarta dalam menyerap sejumlah karbondioksida dari atmosfer selama setahun. Nilai total keseluruhan potensi serapan karbondioksida di Kota Surakarta selama setahun sebesar 7,12 GtCO<sub>2</sub>/ tahun. Nilai serapan karbondioksida tersebut sebagian besar disumbang oleh vegetasi di ruang terbuka hijau yang terdapat di Kota Surakarta. Wujud ruang terbuka hijau di wilayah penelitian berupa kebun campuran, lahan pekarangan, taman kota, dan lahan pertanian.



**Gambar 3.3.** Sebaran Nilai NPP dan Serapan Karbondioksida Tahunan di Kota Surakarta

### 3.2. Pembahasan

Hasil pemodelan di wilayah penelitian menunjukkan bahwa nilai serapan karbon mengikuti tren nilai produktivitas primer bersih (NPP). Pola spasial maupun temporal nilai serapan karbon sama dengan pola yang dibentuk oleh nilai NPP. Nilai produktivitas primer bersih (NPP) di kawasan perkotaan utamanya di Kota Surakarta menunjukkan nilai sebesar 383 – 582 gC/m<sup>2</sup>/tahun. Nilai tersebut sangatlah kecil apabila dibandingkan nilai produktivitas primer bersih di kawasan hutan tropis. Beberapa kajian sebelumnya menunjukkan produktivitas primer bersih di kawasan hutan Kalimantan Barat (19); kawasan hutan Leuser; kawasan hutan Berau Kalimantan Timur; kawasan hutan Papua (20); dan kawasan hutan Sulawesi (21) memiliki nilai yang jauh lebih besar. Perbandingan nilai produktivitas primer bersih (NPP) di berbagai kawasan hutan tropis dan wilayah penelitian dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1.** Perbandingan nilai NPP di berbagai kawasan di wilayah iklim tropis

No	Wilayah/ Kawasan	Nilai NPP (gC/m <sup>2</sup> /tahun)	Sumber
1.	Ketapang, Kalimantan Barat	13.200	(19)
2.	Leuser, Aceh	8.950.000	(20)
3.	Berau, Kalimantan Timur	10.300.000	(20)
4.	Kamulo Doso, Papua New Guinea	10.120.000	(20)
5.	Merang, Sumatera Selatan	10.790.000	(20)
6.	Sulawesi	8.400	(21)

Berdasarkan Tabel 4.1. dapat diketahui bahwa nilai NPP antara kawasan perkotaan dan hutan menunjukkan perbedaan nilai yang sangat jauh, walaupun sama-sama terletak di wilayah tropis. Perbedaan nilai NPP antara kedua kawasan tersebut disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan dan jenis vegetasi (19,22–24).

Vegetasi pada kawasan hutan memiliki nilai kerapatan yang tinggi bila dibandingkan vegetasi pada kawasan perkotaan. Vegetasi di kawasan perkotaan yang hanya tumbuh pada lahan pekarangan rumah atau taman kota tidak lebat seperti di kawasan hutan karena adanya aktivitas pemotongan dan pemeliharaan oleh manusia agar terlihat rapi. Selain itu, vegetasi pada kawasan perkotaan yang cenderung homogen menjadikan nilai NPP cenderung kecil. Nilai produktivitas primer bersih akan jauh lebih kecil pada lahan dengan keanekaragaman vegetasi rendah (homogen) dibandingkan pada lahan dengan keanekaragaman vegetasi tinggi (heterogen) seperti pada kawasan hutan tropis (22,23).

Di sisi lain, produktivitas primer bersih di wilayah penelitian memiliki nilai relatif tinggi apabila dibandingkan pada kawasan perkotaan yang terletak di wilayah iklim sedang. Beberapa penelitian pada kawasan perkotaan di wilayah iklim sedang seperti di Anhui, China (24); Nanjing, China (25); Southern, United States (26); Liaoning, China (17); and Guangzhou City, China (18) menunjukkan nilai relatif kecil dibandingkan di wilayah penelitian. Perbandingan nilai NPP di wilayah kajian dengan kawasan perkotaan lain dapat dilihat pada Tabel 4.2. Masih tingginya nilai NPP di Kota Surakarta disebabkan karena masih adanya beberapa ruang terbuka ditumbuhi oleh vegetasi, seperti pada lahan pekarangan rumah, lahan pemakaman, dan pinggir sungai. Selain itu, masih terdapatnya lahan pertanian di batas terluar Kota Surakarta ikut berperan dalam menyumbang nilai NPP di wilayah penelitian. Hal ini sangat berbeda pada kawasan perkotaan di China dan United States, dimana kawasan perkotaan sudah didominasi oleh lahan terbangun berupa kawasan permukiman dan industri yang memiliki nilai NPP mendekati 0 (18,25,26).

**Tabel 4.2.** Perbandingan nilai NPP di berbagai kawasan perkotaan

No	Wilayah/ Kawasan	Nilai NPP (gC/m <sup>2</sup> /thn)	Sumber
1.	Anhui, China	200	(24)
2.	Nanjing, China	250 – 300	(25)
3.	Laoning, China	227 – 252	(17)
4.	Guangzhou, China	183	(18)
5.	Guangdong, China	384	(27)
6.	Southern, United States	231 – 269	(26)

Faktor lain yang mempengaruhi perbedaan nilai NPP pada kawasan perkotaan di wilayah beriklim tropis dan sedang yaitu dinamika tahunan dari nilai NPP tersebut. Nilai NPP di wilayah penelitian menunjukkan adanya dinamika bulanan selama setahun. Nilai NPP mengalami peningkatan pada saat berakhirnya musim kemarau menuju ke musim penghujan (masa growing season) dan akan kembali menurun menuju ke musim kemarau. Penyebab terjadinya dinamika nilai NPP di wilayah penelitian yaitu faktor lingkungan utamanya iklim dan adanya aktivitas antropogenik.

#### 4. KESIMPULAN

Nilai serapan karbondioksida di kawasan perkotaan menunjukkan nilai yang relatif kecil dibandingkan dengan di kawasan hutan. Rendahnya nilai serapan karbondioksida di kawasan perkotaan disebabkan karena kerapatan vegetasi yang rendah dan jenis vegetasi yang homogen. Namun, nilai tersebut relatif besar jika dibandingkan dengan kawasan perkotaan lain yang terletak di iklim sedang dengan 4 musim. Hal ini disebabkan kawasan perkotaan di wilayah penelitian masih terdapat beberapa lahan yang dikhususkan untuk ditumbuhi vegetasi berupa ruang terbuka hijau baik yang dimiliki oleh pemerintah ataupun pribadi. Selain itu, keberadaan lahan pertanian yang cukup luas di perbatasan wilayah penelitian ikut menyumbang potensi serapan karbondioksida. Oleh karena itu, sangatlah penting mengkuantifikasi nilai serapan karbondioksida yang dimiliki oleh

kawasan perkotaan di wilayah iklim tropis karena dapat digunakan sebagai upaya pencapaian target pengurangan emisi karbondioksida.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim survei yaitu Muhammad Abdul Latief, Kartika Cindi Wulandari, Hengky Setiawan, Danis Novianto, Tegar Abdul Hafid, dan Muhammad Ismail Islam serta kepada Universitas Muhammadiyah Surakarta (UMS). Penelitian ini terlaksana atas pembiayaan di bawah skema ‘Penelitian Unggulan Program Studi’ UMS dengan judul “Neraca Karbon Ekosistem Sebagai Alternatif Mitigasi Perubahan Iklim Regional di Kota Surakarta”.

#### REFERENSI

1. Guitart AB, Rodriguez LCE. Private valuation of carbon sequestration in forest plantations Private valuation of carbon sequestration in forest plantations. *Ecol Econ* [Internet]. 2010;69(3):451–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.10.005>
2. Torres AB, MacMillan T, Skutsch M, Lovett JC. The valuation of forest carbon services by Mexican citizens : The case of Guadalajara city and La Primavera biosphere reserve The valuation of forest carbon services by Mexican citizens : the case of Guadalajara city and La Primavera biosphere reserve. *Reg Environ Chang*. 2013;13:661–80.
3. Mukhortova L, Schepaschenko D, Shvidenko A. Soil contribution to carbon budget of Russian forests. *Agric For Meteorol*. 2015;200:97–108.
4. Schuur EAG, Chadwick OA, Matson PA. Carbon Cycling And Soil Carbon Storage In Mesic To Wet Hawaiian Montane Forests. *Ecology*. 2001;82(11):3182–96.
5. Bian J, Li A, Deng W. Estimation and analysis of net primary Productivity of Ruoergai wetland in China for the recent 10 years based on remote sensing International Society for Environmental Information Sciences 2010 Annual Conference ( ISEIS ) Estimation and analysis of net p. *Procedia Environ Sci*. 2015;2(2010):288–301.
6. Gong W, Wang L, Lin A, Zhang M. Evaluating the monthly and interannual variation of net primary production in response to climate in Wuhan during 2001 to 2010. *Geosci J* [Internet]. 2012;16(3):347–55. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12303-012-0025-4>
7. Wang B, Yang S, Lu C, Zhang J, Wang Y. Comparison of net primary productivity in karst and non-karst areas : a case study in Guizhou Province , China. *Environ Earth Sci*. 2010;59:1337–47.
8. Lovett GM, Cole JJ, Pace ML. Is Net Ecosystem Production Equal to Ecosystem Carbon Accumulation ? *Ecosystem*. 2006;9:152–5.
9. Odum EP. The Strategy of Ecosystem Development. *Science* (80- ) [Internet]. 1969 Apr 18;164(3877):262 LP – 270. Available from: <http://science.sciencemag.org/content/164/3877/262.abstract>
10. Prentice IC, Heimann M, Sitch S. The Carbon Balance of The Terrestrial Biosphere: Ecosystem Models and Atmospheric Observations. *Ecol Appl*. 2000;10:1553–73.
11. Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, et al. Terrestrial Ecosystem Production : A Process Model Based on Global Satellite and Surface Data. *Global Biogeochem Cycles*. 1993;7(4):811–41.
12. Prince SD, Goward SN. Global Primary Production : A Remote Sensing Approach. *J Biogeogr*. 1995;22:815–35.
13. Goetz SJ, Prince SD, Small J, Gleason ACR. Interannual variability of global terrestrial primary production : observations that differed regionally over the 8-year integrated global slight trend toward increased values through with boreal regions increasing regions

- for each 1°C rise in air tempera. *J Geophys Res.* 2000;105:20077–91.
14. Xiao X, Zhang Q, Saleska S, Hutyrá L, Camargo P, Wofsy SC, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sens Environ.* 2005;94:105–22.
  15. Chen J, Brosofske KD, Noormets A, Crow TR, Bresee MK, Le Moine JM, et al. A Working Framework for Quantifying Carbon Sequestration in Disturbed Land Mosaics. *Environ Manage [Internet]*. 2004;33(1):S210–21. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00267-003-9131-4>
  16. Running SW, Nemani RR, Heinsch FA, Zhao M, Reeves M, Hashimoto H. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *Biosciences.* 2004;54(6):547–60.
  17. Chen T, Huang Q, Liu M, Li M, Qu L, Deng S, et al. Decreasing Net Primary Productivity in Response to Urbanization in Liaoning Province, China. *Sustainability.* 2017;9(162):1–17.
  18. Wu Y, Wu Z, Liu X. Dynamic Changes of Net Primary Productivity and Associated Urban Growth Driving Forces in Guangzhou City, China. *Environ Manage [Internet]*. 2020;65:758–73. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-020-01276-7>
  19. Basuki I, Kauffman JB, Peterson J, Anshari G, Murdiyarso D. Land cover changes reduce net primary production in tropical coastal peatlands of West Kalimantan, Indonesia. *Mitig Adapt Strateg Glob Chang.* 2019;24:557–73.
  20. Potter C, Klooster S, Genovese V, Hiatt C. Forest production predicted from satellite image analysis for the Southeast Asia region. *Carbon Balance Manag [Internet]*. 2013;8(9):1–6. Available from: Carbon Balance and Management
  21. Hertel D, Moser G, Culmsee H, Erasmi S, Horna V, Schuldt B, et al. Forest Ecology and Management Below- and above-ground biomass and net primary production in a paleotropical natural forest ( Sulawesi, Indonesia ) as compared to neotropical forests. *For Ecol Manage.* 2009;258(9):1904–12.
  22. Ji Y, Zhou G, Luo T, Dan Y, Zhou L, Lv X. Variation of net primary productivity and its drivers in China's forests during 2000 – 2018. *For Ecosyst.* 2020;7:1–11.
  23. Malhi Y, Doughty C, Galbraith D. The allocation of ecosystem net primary productivity in tropical forests. *Philos Trans R Soc.* 2011;366:3225–45.
  24. Yang H, Hu D, Xu H, Zhong X. Assessing the spatiotemporal variation of NPP and its response to driving factors in Anhui province, China. *Environ Sci Pollut Res.* 2020;27:14915–32.
  25. Zhou Y, Xing B, Ju W. Assessing the Impact of Urban Sprawl on Net Primary Productivity of Terrestrial Ecosystems Using a Process-Based Model — A Case Study. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens.* 2015;8:2318–31.
  26. Milesi C, Elvidge CD, Nemani RR, Running SW. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States. *Remote Sens Environ.* 2003;86(2003):401–10.
  27. Jiang Y. The contribution of human activities to dissolved inorganic carbon fluxes in a karst underground river system: Evidence from major elements and  $\delta^{13}\text{C}$  DIC in Nandong, Southwest China. *J Contam Hydrol [Internet]*. 2013;152:1–11. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.05.010>