

Jurnal Ilmu Kehutanan

Journal of Forest Science
<https://jurnal.ugm.ac.id/jikfkt>



Pendugaan Simpanan Karbon pada Kawasan Rehabilitasi Pesisir Selatan Pulau Jawa

Carbon Stock Estimation in the South Coastal Rehabilitation Area of Java Island

Budiadi

Departemen Silvikultur, Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281
Email: budiadi@ugm.ac.id

HASIL PENELITIAN

Riwayat Naskah:

Naskah masuk (received): 18 Mei 2019

Diterima (accepted): 29 Januari 2020

KEYWORDS

silviculture, climate change, mudflat-sediment, productivity

ABSTRACT

Carbon conservation is one of important actions for coastal rehabilitation, in particular in the south coast of Java Island with its unique characteristics of strong tide, high salinity and diverse substrates. The research aimed to estimate carbon stocks from various carbon pools in the coast rehabilitation area, including wetland sites (14-year-old mangroves of Avicennia/AV, Rhizophora/RH and mix mangrove/MX, mudflat-sediment/SD, grassland/GR) and dry-sandy site of 18-year-old Casuarina equisetifolia/CS. Three to nine plots were established for observing and measuring vegetation, as well as taking soil sample at 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm depths. Tree biomass were estimated by converting tree-stem diameter using allometric equation. The tree biomass were converted into tree carbon using carbon density of 0.464 for above-ground (AGC), and 0.39 for below-ground (BGC), and to estimate total biomass carbon (TBC). Soil organic carbon (SOC) was analyzed separately, and combined with biomass carbon to estimate total carbon stock in the ecosystems. High variation of tree growth and density were found, especially in mangrove stands, with a low level of natural regeneration. No significant difference of carbon stock in biomass between mangroves and Casuarina was observed. Average TBC in mangroves (46.08 Mg C/ha) was slightly lower than in CS (51.50 Mg C/ha). In below ground (up to 60 cm depth), wetland sites (AV, RH, MX, SD and GR) significantly stored more SOC than dry land (CS). Soil depth significantly affected SOC, but in wetland sites deeper soil contained more carbon than upper, while an opposite trend was observed in CS. Estimated total carbon stock in the coast was 248.52 (± 87.21) Mg C/ha, with the lowest in CS (94.46 Mg C/ha) and highest in MX (324.77 Mg C/ha). Rehabilitation activities in the coast possibly improve carbon stock in the ecosystems due to tree biomass, compared to open sites of SD and GR. In the wetland or mangroves, most of carbon was observed as SOC, and less in the dry-land site. The different characteristics of carbon storage in the south coast need different conservation techniques, but both sites need intensive rehabilitation work and artificial regeneration.

KATA KUNCI

silvikultur, perubahan iklim, sedimen, produktivitas

INTISARI

Konservasi karbon merupakan salah satu tindakan penting dalam rehabilitasi pesisir, khususnya pesisir selatan Pulau Jawa dengan keunikan ombak yang besar, salinitas tinggi dan sedimen beragam. Penelitian dilaksanakan untuk menduga simpanan karbon dalam

berbagai bagian pada areal pesisir tersebut, yang terdiri dari tapak tergenang (tegakan mangrove 14 tahun jenis *Avicennia*/AV, *Rhizophora*/RH dan campuran/MX, lahan sedimen/SD, rumput/GR) dan tapak kering berpasir tegakan *Casuarina equisetifolia*/CS umur 18 tahun. Tiga sampai sembilan petak ukur dibuat untuk pengamatan dan pengukuran vegetasi, serta pengambilan sampel tanah (kedalaman 0-20, 20-40 dan 40-60 cm), dan pengukuran tegakan. Biomasa pohon diestimasi dengan mengkonversi diameter batang (DBH) menggunakan persamaan alometrik. Biomasa pohon dirubah menjadi karbon tersimpan menggunakan berat jenis kayu yaitu 0,464 untuk *above-ground* (AGC), dan 0,39 untuk *below-ground* (BGC), serta untuk menduga biomasa karbon total (TBC). Karbon organik tanah (COT) dianalisis secara terpisah, dan digabungkan dengan karbon biomasa untuk memperkirakan simpanan karbon dalam ekosistem. Hasil penelitian menunjukkan variasi yang tinggi dari pertumbuhan dan kerapatan pohon, khususnya pada tegakan mangrove, dengan kemampuan regenerasi yang rendah. Tidak ditemukan perbedaan yang nyata dari simpanan karbon pada biomasa antara tegakan mangrove dengan *Casuarina*. Rerata TBC pada mangrove adalah 46,08 Mg C/ha, sedikit lebih rendah daripada CS (51,50 Mg C/ha). Di bawah tanah (hingga kedalaman 60 cm), tapak tergenang (AV, RH, MX, SD dan GR) secara nyata menyimpan COT lebih besar daripada tapak kering (CS). Kedalaman tanah secara nyata mempengaruhi COT, namun pada tapak tergenang semakin dalam tanah maka COT semakin besar, sedangkan tren sebaliknya pada tapak kering. Perkiraan total karbon tersimpan adalah 248.52 (± 87.21) Mg C/ha, dengan terendah pada CS (94.46 Mg C/ha) dan tertinggi pada MX (324.77 Mg C/ha). Rehabilitasi pesisir berpeluang meningkatkan simpanan karbon ekosistem karena adanya adanya biomasa pohon, dibandingkan tapak terbuka yakni SD dan GR. Pada tapak tergenang/tegakan mangrove sebagian besar simpanan karbon berupa COT, dan lebih sedikit ditemukan pada CS. Perbedaan karakteristik simpanan karbon ini memerlukan penanganan atau konservasi yang berbeda, tetapi sama-sama membutuhkan rehabilitasi dan regenerasi buatan yang intensif.

© Jurnal Ilmu Kehutanan -All rights reserved

Pendahuluan

Garis pantai Indonesia merupakan rumah bagi berbagai ekosistem pesisir tropis terkaya di dunia (Alongi et al. 2016) termasuk ekosistem hutan mangrove dan hutan pantai. Kedua jenis ekosistem tersebut memiliki peran yang besar untuk perlindungan areal daratan dari abrasi dan bencana tsunami, konservasi biodiversitas dan fungsi ekologis lainnya (Andhikari & Baral 2018). Selain itu, ekosistem pesisir sangat potensial untuk peningkatan serapan karbon terkait upaya mitigasi perubahan iklim global yang dikenal sebagai *blue carbon*, yaitu kawasan yang mampu menyimpan karbon di dalam biomasa dan sedimennya dalam jumlah besar (Ati et al. 2014). Jika tidak dilakukan pengelolaan yang baik, kawasan tersebut rentan terdegradasi dan

justru berubah menjadi penyumbang emisi karbon (Purnobasuki 2012).

Kawasan pesisir terdiri dari dua kelompok tapak yang berbeda, yaitu tapak tergenang yang didominasi oleh endapan sedimen dan tapak kering yang didominasi oleh tanah pasiran. Ekosistem hutan mangrove berada pada tapak tergenang lahan pasang surut pantai serta tanah lumpur berpasir di atas garis pasang tertinggi (Tuheteru & Mahfudz 2012). Luas ekosistem hutan mangrove di seluruh pesisir Indonesia mencapai 3,5 juta hectare (ha) (Setiyowati et al. 2016), dan diperkirakan mampu menyimpan 800 – 1.200 ton CO₂/ha (Finesso 2012) atau menyerap 120 juta ton CO₂ di udara (Setiyowati et al. 2016). Tanah bagian dalam pada ekosistem hutan mangrove kaya akan kandungan bahan organik karena rendahnya

tingkat dekomposisi aerobik, sehingga cadangan C pada mangrove didominasi oleh karbon (C) di bawah permukaan tanah (Donato et al. 2012). Selain ekosistem hutan mangrove, ekosistem pesisir pada areal kering dan berpasir umumnya dikelola dalam bentuk hutan tanaman cemara laut (*Casuarina equisetifolia*). Jenis ini mampu beradaptasi terhadap tapak marginal, mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap salinitas dan kekeringan, mempunyai perakaran yang dalam (Nurjanto et al. 2009), dan memiliki pertumbuhan yang cepat dengan akumulasi karbon mencapai 8,2 Mg C/ha/tahun (Wang et al. 2013). Cemara laut merupakan jenis pionir yang sering digunakan untuk rehabilitasi kawasan pantai yang memiliki fungsi utama dalam meningkatkan kelembaban tanah, memecah angin (*wind break*), menurunkan kadar garam udara (Nurjanto et al. 2009) dan meningkatkan kesuburan tanah (Singh et al. 2011). Berbeda dengan ekosistem mangrove, akumulasi C pada ekosistem hutan tanaman cemara laut didominasi oleh C di atas permukaan tanah (Wang et al. 2013).

Pesisir selatan Pulau Jawa berhadapan langsung dengan Samudra Hindia yang memiliki karakter khas yaitu ombak yang besar, salinitas air yang tinggi dan komposisi substrat sedimen yang beragam (Budiadi et al. 2016). Konservasi, rehabilitasi dan pembangunan jalur hijau di wilayah pesisir merupakan kebutuhan mendesak karena besarnya ancaman kebutuhan lahan untuk kegiatan ekonomi masyarakat, serta kerentanan terhadap bencana alam, seperti tsunami (Goltenboth et al. 2006). Karena kondisi yang khas di pesisir selatan Jawa, proporsi areal yang sesuai untuk ditanami mangrove dan pantai tidak cukup luas (misalnya dalam Budiadi et al. 2016; Setiawan 2013). Berdasarkan kesesuaian lahan tersebut, rehabilitasi mangrove di Baros dilakukan oleh masyarakat hanya seluas 3,5 hektare dibandingkan panjang garis pantai yang mencapai 17 km (Cahyawati 2012). Secara umum di wilayah pesisir selatan Jawa dibutuhkan hutan mangrove dan hutan pantai yang baik untuk perlindungan ekosistem perairan dan daratan, sekaligus untuk penyimpanan karbon untuk mendukung mitigasi perubahan iklim. Untuk mengetahui peran rehabilitasi mangrove dan pantai dalam penyimpanan karbon, maka diperlukan pengukuran nilai cadangan karbon dalam

biomasa dan di dalam tanah hingga mencapai umur tegakan tertentu pasca dilaksanakan rehabilitasi. Hal ini dilakukan sebagai upaya konservasi untuk menghindari hilangnya cadangan karbon pada ekosistem yang terdegradasi ke atmosfer dan lautan (Alongi et al. 2016). Hasil dari penelitian ini akan memberikan informasi status dan karakteristik simpanan karbon di pesisir selatan P. Jawa secara umum, sehingga bisa diberikan tindakan dan pengelolaan yang tepat untuk peningkatan fungsi kawasan.

Bahan dan Metode

Pengambilan data di lapangan dilakukan pada musim kemarau yaitu bulan Mei dan Juni 2016, untuk menyesuaikan turunnya permukaan air laut pada lahan mangrove. Melalui deliniasi citra *Google Earth* standar ISO-3166 (Sukri & Yeni 2016) dan survei pendahuluan, lokasi penelitian dibagi menjadi enam tapak berdasarkan vegetasi yang mendominasi atau tutupan lahan dan kondisi ekologis spesifiknya. Tapak-tapak tersebut yaitu tapak lahan basah tegakan *Avicennia* (AV) monokultur, *Rhizophora* (RH) monokultur, tegakan mangrove campuran (MX) masing-masing berumur 14 tahun, rumput (GR), dan lahan sedimen lumpur/*mudflat* (SD) di areal konservasi mangrove Pantai Baros (7°59'43.18"S; 110°17'07.64"E), serta tegakan *C. equisetifolia* umur 18 tahun (CS) pada tapak pantai kering berpasir (*dry-sandy soil*) di pesisir Pantai Samas (8°00'14.87"S; 110°15'47.83"E) (Gambar 1). Vegetasi pada tiap tapak diidentifikasi dan dilakukan pengukuran tinggi total serta diameter pohon setinggi dada (DBH) (Sutaryo 2000) pada plot-plot berukuran 10 x 10 meter pada tapak mangrove, 20 x 20 meter pada tapak CS (Bismark 2011), yang ditempatkan secara purposif sesuai pemerataan kondisi tanaman. Jumlah plot bervariasi tiap tapak (yakni tiga plot pada MX, GR, SD, CS, enam plot pada RH dan sembilan plot pada AV) tergantung pada ketersediaan lokasi dan keseragaman kondisi tapak/tegakan. Pengambilan sampel tanah terusik secara komposit menggunakan bor tanah dilakukan pada masing-masing tapak seberat sekitar 500 g, pada tiga spot yang berbeda sebagai ulangan. Sampel dipisahkan pada strata vertikal yaitu kedalaman 0 – 20 cm, 20 – 40 cm dan 40 – 60 cm, kemudian dimasukkan ke dalam kantong plastik dan dibawa ke laboratorium untuk dianalisis.



Gambar 1. Lokasi penelitian di area rehabilitasi pesisir selatan Pulau Jawa, terdiri dari tapak tergenang di Konservasi mangrove Baros dan tapak kering berpasir Pantai Samas

Figure 1. Research site in coastal rehabilitation area in south Java Island, consists of wetland site at Baros mangrove conservation area and dry-land site of Samas beach

Biomasa dan karbon tersimpan

Biomasa dan karbon tersimpan pada pohon dihitung dengan menggunakan persamaan alometrik yang didapatkan dari penelitian terdahulu pada lokasi yang berbeda, tanpa melakukan pemanenan (*non-destructive sampling*), melalui pengukuran diameter (DBH), tinggi (T) dan berat jenis kayu (B). Biomasa dan karbon tersimpan pada setiap bagian pohon meningkat seiring bertambahnya diameter batang (Agustin et al. 2011), sehingga parameter batang (DBH, T dan B) digunakan sebagai variabel perhitungan biomasa pohon secara keseluruhan.

Taksiran biomasa dipisahkan menjadi biomasa di atas permukaan tanah (*Aboveground Biomass*, AGB) dan di bawah tanah (*Belowground Biomass*, BGB). Pendugaan biomasa untuk jenis *Avicennia marina* dan *Rhizophora* spp. dilakukan dengan menggunakan persamaan alometrik sesuai dengan penelitian Komiyama et al. (2008) *C. equisetifolia* dan jenis lain dengan persamaan dari Manuri et al. (2017), dengan nilai berat jenis kayu berdasarkan Chave et al. (2009) dan data pada website ICRAF Database. BGB diduga dengan menggunakan persamaan menurut Pearson et al. (2005). Persamaan yang digunakan untuk pendugaan biomasa tegakan disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Persamaan alometrik untuk pendugaan *Above-ground Biomass* (AGB) dan *Below Ground Biomass* (BGB) beberapa jenis tanaman mangrove dan pesisir

Table 1. Allometric equations for estimating Aboveground biomass (AGB) and Belowground Biomass (BGB) of mangrove and coastal tree species

Jenis	AGB	BGB	Referensi
<i>Avicennia marina</i>	$AGB = 0,308 D^{2,11}$	$BGB = 1,28 D^{1,17}$	Komiyama et al. (2008)
<i>Rhizophora</i> spp.	$AGB = 0,105 (D^{2,68})$	$BGB = 0,00974 (D^2 T)^{1,05}$	Komiyama et al. (2008)
<i>Hibiscus tiliaceus</i>	$AGB = 0,11 \rho D^{2,62 a}$ $b) \rho = 0,4836 \text{ g/cm}^3$		a) Ketterings et al. (2001) b) Online ICRAF Database
<i>Casuarina equisetifolia</i>	$AGB = 0,086(D^2 GH)^{0,955 c}$ $d) G = 0,804 \text{ g/cm}^3$	$BGB = \exp(-1,0587 + 0,8836 \ln AGB) e)$	c) Manuri et al. (2017) d) Chave et al. (2009) e) Pearson et al. (2005)

Keterangan : D = diameter setinggi dada, T = tinggi, ρ = berat jenis kayu.

Remarks : D = diameter at breast height, T = height, ρ = wood density.

Dengan asumsi karbon yang tersimpan dalam biomassa di atas tanah adalah 46,4% dari AGB (Kauffman et al. 2011), dan biomasa akar adalah 39% dari BGB (Kauffman & Donato 2012) maka karbon tersimpan bisa diestimasi dengan persamaan:

$$\text{Above-ground carbon (AGC)} = 0,464 \times \text{AGB} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Below-ground carbon (BGC)} = 0,390 \times \text{BGB} \dots\dots\dots(2)$$

Karbon organik tanah (COT)

Sesuai dengan Prosedur Operasi Standar (SOP) Pengukuran Stok Karbon oleh Lugina et al. (2011), analisis tanah diawali dengan pengujian di laboratorium untuk memperoleh berat jenis (BJ) tanah. Berat jenis tanah adalah parameter yang biasanya digunakan untuk mendeskripsikan kepadatan tanah dan permeabilitas tanah (Eid & Shaltout 2016). Persentase C-organik tanah (%C) dianalisis dengan menggunakan metode *Walkley-Black*.

Hasil analisis tanah digunakan untuk menghitung kandungan C organik tanah (COT) dengan rumus (Pearson et al. 2005):

$$\text{COT} = Kt \times \rho \times \% \text{ C organik (Mg C/ha)} \dots\dots\dots(3)$$

di mana Kt adalah ketebalan sampel tanah (cm) dan ρ adalah BJ (g/cm^3)

Hasil pengukuran biomasa dan simpanan karbon pada biomasa dibandingkan dengan menggunakan *One-way Anova*. Jika ditemukan beda nyata ($P <$

0.005), maka dilakukan uji lanjut dengan Tukey's. Untuk mengetahui pengaruh jenis tutupan lahan dan kedalaman tanah terhadap karbon tersimpan di dalam tanah (COT), hasil pengukuran dibandingkan dengan menggunakan *Two-way Anova*, dengan tipe tutupan lahan sebagai *main treatment* dan kedalaman tanah (0 – 20 cm, 20 – 40 cm dan 40 – 60 cm) sebagai *sub treatment*. Jika ditemukan beda nyata ($P <$ 0.005), maka dilakukan uji lanjut dengan Tukey's. Total karbon tersimpan adalah penjumlahan karbon tersimpan dalam biomasa dan COT, yang selanjutnya dibandingkan secara grafis untuk mengetahui distribusi simpanan karbon saat ini sebagai pengaruh dari aktivitas rehabilitasi kawasan pesisir.

Hasil dan Pembahasan

Kondisi vegetasi dan tapak

Hasil observasi menunjukkan bahwa tidak ditemukan vegetasi berkayu pada tapak rumput (GR) dan lumpur sedimen (SD). Terdapat perbedaan jenis vegetasi yang nyata antara tapak-tapak pada ekosistem hutan mangrove yang basah dengan tapak pada ekosistem hutan pantai kering berpasir. Sesuai dengan karakteristiknya, tapak *Avicennia* (AV), *Rhizophora* (RH) dan tegakan campuran (MX) pada ekosistem hutan mangrove ditumbuhi beberapa jenis mangrove yaitu *Avicennia marina*, *Rhizophora mucronata* dan *Hibiscus tiliaceus*. Tapak Casuarina (CS) pada ekosistem hutan pantai didominasi adalah spesies cemara udang (*C. equisetifolia*) (Tabel 2).

Tabel 2. Karakteristik tegakan pada tapak tergenang dan lahan kering berpasir di areal rehabilitasi pesisir selatan Pulau Jawa
Table 2. Stand characteristics on wetland and dry-sandy soil in the south coastal rehabilitation area of south Java Island

Tipe tapak	Tegakan atau penggunaan lahan	Jenis pohon	Umur (th)	Kerapatan (n/ha)	Diameter (cm)	LBDS (m^2/ha)
Mangrove/ tergenang	Rhizophora (RH)	<i>R.mucronata</i>	14	3467	4,45 ($\pm 1,32$)	5,86 ($\pm 3,29$)
		<i>A.marina</i>	14	200	6,36 ($\pm 3,67$)	0,78 ($\pm 0,83$)
	Avicennia (AV)	<i>A.marina</i>	14	1000	8,83 ($\pm 3,61$)	7,12 ($\pm 5,82$)
	Mangrove campuran (MX)	<i>A.marina</i>	14	2667	10,68 ($\pm 3,01$)	25,69 ($\pm 12,73$)
		<i>R.mucronata</i>	14	1200	3,80 ($\pm 0,36$)	1,37 ($\pm 0,26$)
		<i>H.tiliaceus</i>	14	800	12,38 ($\pm 4,22$)	10,57 ($\pm 6,06$)
Grass (GR)	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	
Sediment (SD)	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	
Kering berpasir	<i>C. equisetifolia</i> (CS)	<i>C. equisetifolia</i>	18	467	19,87 ($\pm 1,40$)	16,12 ($\pm 7,43$)

Ketiga jenis mangrove yang dominan pada tapak AV, RH dan MX merupakan jenis tumbuhan khas ekosistem pesisir yang berasosiasi dengan hutan mangrove (Noor et al. 1999). Komposisi jenis tersebut tidak berbeda dengan dominasi jenis tanaman mangrove di pesisir selatan maupun utara Jawa yang didominasi oleh tiga jenis yaitu *Avicennia* spp., *Sonneratia* spp., dan *Rhizophora* spp (Setyawan et al. 2005), namun sedikit berbeda dengan penelitian Setiawan (2013) yang menyebutkan lima jenis mangrove di wilayah Baros yaitu *A. alba*, *A. marina*, *R. apiculata*, *R. mucronata* dan *B. Gymnorhiza*.

Diameter setinggi dada (DBH) pohon pada tapak ekosistem mangrove bervariasi antara 1,91 – 17,98 cm, dengan rata-rata 7,18 cm dan *R. mucronata* merupakan jenis dengan rata-rata diameter terkecil (4,45 cm). Rerata diameter *R. mucronata* yang berumur 14 tahun pada lokasi tersebut tidak jauh berbeda dengan kondisi di kawasan rehabilitasi mangrove Nusa Lembongan, Bali (Paper et al. 2014). Rata-rata DBH spesies *C. equisetifolia* adalah 19,87 ($\pm 1,40$) cm, relatif lebih besar dibandingkan dengan rata-rata DBH spesies yang ada pada tapak mangrove. Selain karena umur yang lebih tua (umur 18 tahun), juga menunjukkan bahwa *C. equisetifolia* merupakan spesies yang beradaptasi dengan baik dan cepat tumbuh pada tapak kering berpasir (Nurjanto et al. 2009).

Sebanding dengan besarnya rerata DBH, luas bidang dasar (LBDS) terbesar juga terdapat pada tapak MX, yaitu 16,84 ($\pm 14,57$) m²/ha, dan terkecil pada tapak RH (5,58 \pm 3,41 m²/ha). Meskipun merupakan hasil rehabilitasi atau penanaman dengan jarak tanam rata-rata 3x3 m, namun kerapatan tegakan bervariasi, yaitu antara 200-3.467

individu/ha pada tapak-tapak mangrove (dengan *R. mucronata* memiliki kerapatan tertinggi), sedangkan kerapatan jenis pada tapak CS adalah 467 individu/ha. Hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan hidup (*survival*) dan kapasitas regenerasi secara alami untuk semua jenis tegakan pada kawasan pesisir sangat bervariasi, sehingga dibutuhkan tindakan pengaturan secara intensif.

Estimasi karbon tersimpan pada biomasa tegakan hidup (*Living biomass*)

Hasil analisis data menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan dari karbon tersimpan dalam biomasa hidup/*living biomass* di atas tanah (AGC), di bawah tanah (BGC), dan total/*total biomass carbon* (TBC) ($P < 0,001$ dan $F = 7,610; 8,862$ dan $7,726$ berturut-turut untuk AGC, BGC dan TBC), dengan nilai total karbon tersimpan dalam biomasa tertinggi pada tegakan MX yaitu 105,62 ($\pm 57,12$) Mg C/ha (Tabel 3). Tegakan yang berada di tapak tergenang atau mangrove memiliki potensi untuk dapat tumbuh dan menyimpan karbon (dalam *living biomass*) lebih banyak dibandingkan dengan tegakan yang berada pada tapak kering berpasir. Tanah pada tapak tergenang memiliki potensi kandungan bahan organik yang tinggi dari sedimen, namun memiliki faktor pembatas yang ekstrem, yaitu nilai pH yang relatif rendah dan kadar salinitas air yang tinggi (Tuheteru & Mahfudz 2012).

Hasil pendugaan menunjukkan bahwa total karbon tersimpan pada biomasa hidup (TBC) pada tapak mangrove yaitu 46,08 Mg C/ha (atau ekuivalen dengan 3,29 Mg C/ha/th) dan pada ekosistem hutan pantai dengan tegakan *C. equisetifolia* yaitu 51,50 Mg C/ha (atau ekuivalen dengan 2,86 Mg

Tabel 3. Estimasi karbon tersimpan dalam biomasa pohon pada areal rehabilitasi pesisir selatan Pulau Jawa
Table 3. Estimation of carbon storage in living tree biomass in the south coastal rehabilitation area of Java Island

Jenis tegakan	AGC (Mg C/ha)	BGC (Mg C/ha)	TBC (Mg C/ha)
<i>Avicennia</i> (AV)	34,18 \pm 17,52 a	15,62 \pm 5,81 a	49,8 \pm 23,13 a
<i>Rhizophora</i> (RH)	12,98 \pm 7,75 a	3,1 \pm 2,32 a	16,08 \pm 9,81 a
Mangrove campuran (MX)	81,74 \pm 42,21 b	30,03 \pm 18,63 b	111,77 \pm 60,83 b
<i>C. equisetifolia</i> (CS)	44,78 \pm 21,36 a	6,72 \pm 3,03 a	51,50 \pm 24,38 a

Keterangan: ABC = Above-ground biomass carbon, BBC = Below-ground biomass carbon, TBC = Total biomass carbon; Perbedaan huruf yang menyertai angka menunjukkan beda nyata

Remarks : ABC = Above-ground biomass carbon, BBC = Below-ground biomass carbon, TBC = Total biomass carbon; Different characters following numbers indicate significant difference

Tabel 4. Perbandingan *total biomass carbon* (TBC) dalam tegakan mangrove Baros di pantai selatan Jawa dengan hutan mangrove lain di Indonesia.**Table 4.** Comparison of *total biomass carbon* (TBC) in Baros mangrove stand in south coast of Java with other mangrove forests in Indonesia.

Lokasi	Spesies	Karakteristik tegakan	TBC (Mg/ha)	Sumber
Baros, Yogyakarta	<i>R. mucronata, A. marina, dan H. tiliaceus</i>	Rerata DBH 10,82 cm, kerapatan 1400 n/ha, LBDS 12,87 m ² /ha	46,86	Penelitian ini
Alas Purwo, Jawa Timur	<i>R. mucronata, Bruguiera cylindrica, A. officinali, dan Xylocarpus moluccensis</i>	Rerata DBH 21,24 cm, kerapatan 683 n/ha, LBDS 25,10 m ² /ha	179,39	Heriyanto & Subiandono (2012)
Bandar Bakau Dumai, Riau	<i>X. granatum, R. apiculata, R. mucronata, B. gymnorrhiza, A. alba, A marina, Sonneratia alba, Lumnitzera racemosa, L. littorea dan Scyphiphora hydrophyllacea.</i>	Rerata DBH 8,02 cm, kerapatan 1696 n/ha	57,91	Mandari et al. (2016)
Tanjung Lesung, Banten	<i>A. marina, B. gymnorrhiza</i>	Range DBH 3,18 – 36,62 cm, range kerapatan 140-560 n/ha,	107,27	Rustam et al. (2014)
Subelen Siberut, Sumatera Utara	<i>R. apiculata, R. mucronata, B. cylindrica, B. gymnorrhiza, X. granatum, Barringtonia race-mosa, Ceriops tagal, Aegyceras corniculatum, L. littorea dan A alba,</i>	Rerata DBH 22,07 cm, kerapatan 120 n/ha	24,56	Bismark et al. (2008)
Nusa Lembongan, Bali	<i>B. gymnorrhiza, R. apiculata, R. mucronata, S. alba and X. granatum</i>	Rerata DBH 9,92 cm, range kerapatan 100-2620 n/ha	90,72	Paper et al. (2014)

C/ha/th). Angka TBC pada lokasi ini lebih kecil dibandingkan dengan penelitian Wang et al. (2013) untuk tanaman berumur 6 – 13 tahun yaitu 4,2 Mg C/ha/tahun, namun lebih besar daripada tanaman umur 13 – 18 tahun yaitu 1 Mg C/ha/tahun. Namun demikian, TBC pada tegakan mangrove pada lokasi penelitian ini relatif lebih kecil bila dibandingkan dengan karbon pada biomasa hutan mangrove di Tanjung Lesung Banten, dan Nusa Lembongan Bali; dan lebih besar daripada pengukuran di Bandar Bakau Riau, Subelen Siberut Sumatra Utara (Tabel 4). Banyak faktor yang mempengaruhi simpanan karbon dalam biomasa mangrove diantaranya adalah produksi primer, respirasi, pertukaran C, hidrologi, kecepatan sedimentasi, perubahan pada siklus nutrien, perubahan suhu, perubahan permukaan laut, lokasi sepanjang pasang surut dan komposisi jenis (McLeod et al. 2011). Diketahui bahwa >80% simpanan karbon berasal dari pohon dengan diameter 25 – 30 cm (Baderan 2017), sedangkan rata-rata diameter tegakan mangrove pada lokasi ini masih relatif kecil. Selain stok karbon pada organ tumbuhan yang didominasi oleh karbon pada batang (Agustin et al. 2011), akumulasi biomasa berpotensi

dalam peningkatan simpanan karbon organik tanah (Ilmiliyana et al. 2012).

Kandungan karbon organik tanah (COT)

Perbedaan tapak atau jenis tutupan lahan berpengaruh sangat nyata terhadap kandungan C, berat jenis dan karbon organik tanah/COT untuk pengukuran hingga kedalaman 60 cm dari permukaan tanah ($F = 22,896$, $P < 0.001$; $F = 45,334$, $P < 0.001$ dan $F = 14,208$, $P < 0.001$ berturut-turut untuk kandungan C, berat jenis dan COT) (Tabel 5, Tabel 6). Secara lebih terperinci, kandungan C pada tutupan *C. equisetifolia* (CS) rata-rata adalah 0,213%, dan lebih rendah daripada tipe penutupan lahan lainnya pada tapak yang relatif tergenang yaitu 1,072%. Berat jenis tanah pada lahan SD (2,17 g/cm³) dan CS (2,30 g/cm³) lebih tinggi daripada tutupan lahan yang lain (AV, RH dan MX), dan terendah pada GR yaitu 1,73 g/cm³.

Perbedaan jenis tutupan pada tapak yang relatif tergenang tidak mempengaruhi COT secara nyata. Sumber COT pada tapak ini tidak hanya berasal dari vegetasi mangrove namun juga endapan padatan di perairan estuari, dan alga bentik (Yong

et al. 2011) dan dipengaruhi oleh perubahan pasang surut, serta endapan sedimen (Wang et al. 2013). Kondisi pasang surut air yang tidak menentu juga menyebabkan adanya penurunan sedimentasi C dan ukuran sedimen C yang dapat meningkat sewaktu-

waktu (Kauffman & Donato 2011). Hal inilah yang kemungkinan besar menyebabkan tapak-tapak tergenang (dalam penelitian ini AV, RH, MX, GR dan SD) memiliki potensi besar dalam penyimpanan karbon di dalam tanahnya.

Tabel 5. Pengaruh perbedaan tapak dan kedalaman tanah terhadap kandungan karbon, berat jenis dan karbon organik tanah (COT) pada areal rehabilitasi pesisir selatan Pulau Jawa

Table 5. Effect of different site and soil depth on carbon content, bulk density and soil organic carbon (SOC) in the south coastal rehabilitation area of south Java Island

Sumber variasi	DF	% C		Berat jenis (g/cm ³)		COT (Mg/ha)	
		MSE	F	MSE	F	MSE	F
Tapak	5	19,914	22,896**	0,450	45,334**	8146,614	14,208**
Kedalaman tanah	2	1,364	0,222 ns	0,014	1,428 ns	25681,907	44,792**
Tapak+kedalaman tanah	10	1,523	1,751 ns	0,013	1,339 ns	1989,796	4,470**

Keterangan: **: beda nyata pada $\alpha= 0,001$; *: beda nyata pada $\alpha= 0,05$; ns= non signifikan

Remarks: ** : significant difference at $\alpha= 0.001$; *: significant difference at $\alpha= 0.05$; ns= non significant

Tabel 6. Rata-rata karbon organik tanah (COT) pada tapak dan kedalaman tanah yang berbeda di areal rehabilitasi pesisir selatan Pulau Jawa

Table 6. Average soil organic carbon (SOC) at different sites and soil depth in the south coastal rehabilitation area of Java Island

Tipe tapak	Tegakan atau penggunaan lahan	Kedalaman (cm)	%C	Berat jenis (g/cm ³)	COT (Mg/ha)	
Mangrove/ tergenang	Avicennia (AV)	20	1,14 ± 0,41	1,84 ± 0,10	41,12 ± 12,57	
		40	0,89 ± 0,25	1,90 ± 0,10	67,12 ± 17,70	
		60	1,27 ± 0,14	1,86 ± 0,12	142,43 ± 16,75	
	Rhizophora (RH)	20	1,18 ± 0,09	1,80 ± 0,07	42,24 ± 1,71	
		40	1,11 ± 0,20	1,80 ± 0,13	78,89 ± 8,44	
		60	1,22 ± 0,13	1,85 ± 0,12	134,94 ± 5,63	
	Mangrove campuran (MX)	20	0,73 ± 0,51	1,77 ± 0,09	25,58 ± 17,37	
		40	0,96 ± 0,26	1,93 ± 0,06	74,48 ± 20,82	
		60	1,06 ± 0,13	1,88 ± 0,03	119,09 ± 16,51	
	Rumput (GR)	20	1,41 ± 0,19	1,64 ± 0,04	46,23 ± 5,98	
		40	0,94 ± 0,11	1,67 ± 0,05	62,98 ± 9,24	
		60	0,80 ± 0,18	1,87 ± 0,18	89,64 ± 19,65	
	Sedimen (SD)	20	1,06 ± 0,46	2,19 ± 0,06	46,39 ± 19,54	
		40	1,06 ± 0,41	2,17 ± 0,03	84,63 ± 37,55	
		60	1,35 ± 0,59	2,14 ± 0,02	173,15 ± 74,32	
	Kering berpasir	<i>C. equisetifolia</i> (CS)	20	0,44 ± 0,34	2,31 ± 0,20	21,10 ± 19,99
			40	0,12 ± 0,15	2,17 ± 0,10	11,68 ± 14,01
			60	0,07 ± 0,04	2,26 ± 0,09	10,19 ± 6,11

Signifikansi

Avicennia (AV)	ns	ns	*
Rhizophora (RH)	ns	ns	*
Mangrove campuran (MX)	ns	ns	*
Rumput (GR)	*	ns	*
Sedimen (SD)	ns	ns	*
<i>C. equisetifolia</i> (CS)	ns	ns	ns

Keterangan: *: beda nyata pada $\alpha= 0,05$; ns= non signifikan

Remarks: * : significant difference at $\alpha= 0.05$; ns= non significant

Tekstur pasiran seperti pada tapak *C. equisetifolia* mempunyai pori makro lebih banyak dibandingkan dengan pori mikro, sehingga kemampuan tanah mengikat air dan unsur hara menjadi rendah (Nugroho 2013). Tingginya pori makro akan menyebabkan kondisi aerob yang selanjutnya akan mendorong oksidasi bahan organik menjadi mineral-mineral tanah (Tangketasik et al. 2012). Kurangnya liat pada tanah tegakan *C. equisetifolia* dapat menjadi faktor utama yang menyebabkan kandungan karbon pada tapak ini rendah. Kandungan bahan organik meningkat seiring bertambahnya kandungan liat (Supriyadi 2008). Liat berfungsi dalam memegang air dan menyebabkan pertukaran udara buruk sehingga menghambat aktivitas mikrobia tanah dalam melapukkan bahan organik (Tangketasik et al. 2012).

Dari penelitian ini diperoleh hasil pengukuran yakni COT hingga kedalaman 60 cm di bawah tegakan CS yaitu 14,32 Mg/ha lebih rendah daripada tapak-tapak yang relatif tergenang yaitu 81,93 Mg/ha. Secara umum, COT ini lebih relatif rendah ini kemungkinan karena pada penelitian ini pengambilan sampel tanah hanya dibatasi hingga kedalaman 60 cm. Selain itu, perbedaan jenis tanah pada dua kelompok tapak yang berbeda dinilai menjadi salah satu faktor yang menyebabkan adanya perbedaan COT yang sangat nyata tersebut. Pada ekosistem hutan mangrove di Baros bahan induk berupa sedimen lumpur bercampur pasir dengan warna gelap dan berbau tajam, dengan tekstur tanah dalam kelas *sandy loam* (lempung berpasir) dengan ketebalan rata-rata $22,10 \pm 14,95$ cm (Setiawan 2013). Sementara itu, bahan induk tanah di tegakan CS adalah pasir pantai yang kering. Lahan pasir pantai memiliki struktur tanah lepas, kemampuan memegang air rendah, infiltrasi dan evaporasi tinggi, dan bahan organik sangat rendah (Rajiman et al. 2008). Oleh sebab itulah, untuk tujuan penyimpanan karbon pada ekosistem pesisir, maka lahan yang tergenang dan ditumbuhi oleh vegetasi mangrove lebih baik dan stabil dibandingkan ekosistem hutan pantai yang didominasi oleh tanah pasiran yang kering.

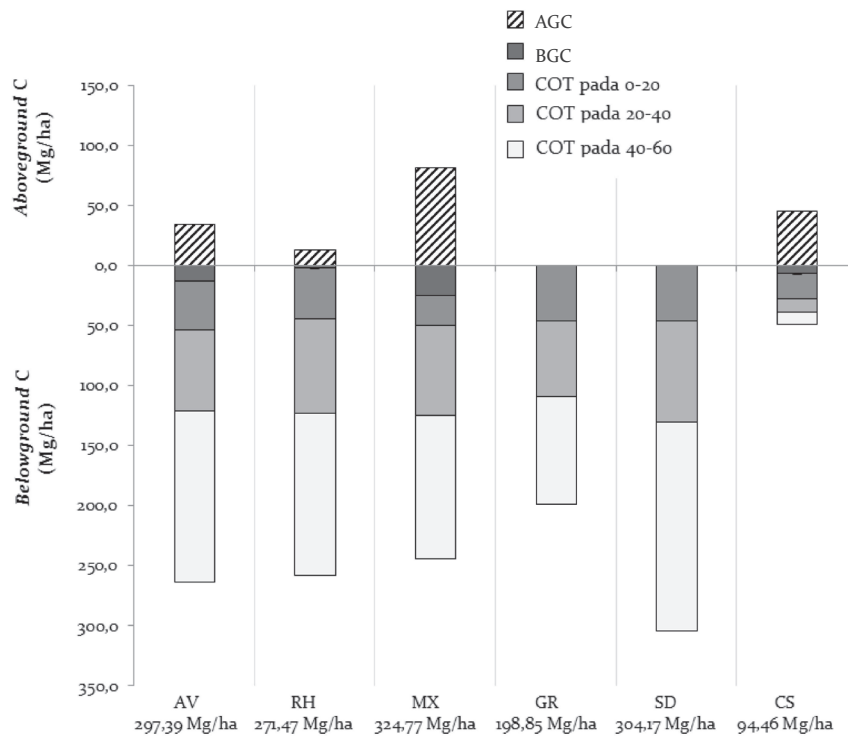
Kedalaman tanah berpengaruh sangat signifikan terhadap COT ($F = 44,792$, $P < 0,001$), namun tidak

berpengaruh terhadap kandungan C dan berat jenis ($F = 1,508$, $P = 0,222$ dan $F = 1,428$, $P = 0,253$ berturut-turut untuk kandungan C dan berat jenis) (Tabel 5, Tabel 6). Meskipun tidak berbeda nyata, rata-rata BJ tanah menurun pada kedalaman 20 – 40 cm namun meningkat lagi pada kedalaman 40 – 60 cm. COT tanah pada tapak relatif tergenang yaitu AV, RH, MX, GR dan SD menunjukkan tren semakin dalam semakin besar, atau kandungan terkecil pada kedalaman 20 cm dan terbesar pada kedalaman 60 cm. Sedangkan pada tapak kering berpasir atau tegakan CS, hasil pengukuran COT menunjukkan hasil, yaitu COT terbesar pada lapisan 20 cm dan terkecil pada kedalaman 60 cm. Jadi, pada lahan lumpur tergenang atau tapak mangrove lapisan yang lebih dalam berpotensi menyimpan lebih banyak karbon, sedangkan pada lahan pasir pantai lapisan atas atau permukaan menyimpan lebih banyak karbon.

Penelitian Donato et al. (2012) menunjukkan bahwa COT terbesar ada di bagian atas lapisan tanah, kemudian nilai tersebut menurun pada kedalaman di bawah satu meter. Sebaliknya Dung et al. (2016) juga melaporkan kecilnya COT pada lapisan tanah teratas di tepi hutan Can Gio Mangrove Park, Vietnam dan terdapat penurunan COT dari kedalaman 0 – 100 cm kemudian mulai stabil pada lapisan 100 – 250 cm.

Simpanan karbon pada ekosistem pesisir

Secara umum, karbon tersimpan pada ekosistem pesisir di lokasi penelitian adalah 248,52 ($\pm 87,21$) Mg C/ha, dengan nilai terendah pada lahan bertutupan *C. equisetifolia* (CS) yaitu 94,46 Mg C/ha dan tertinggi pada tegakan mangrove campuran (MX) yaitu 324,77 Mg C/ha (Gambar 2). Salah satu kontributor simpanan karbon adalah biomasa hidup pada MX, dengan komposisi jenis dan kerapatannya yang lebih kompleks daripada tegakan lainnya. Rehabilitasi pesisir baik dengan tanaman mangrove maupun *C. equisetifolia* terbukti meningkatkan simpanan karbon ekosistem karena adanya biomasa, dibandingkan dengan tapak yang terbuka yakni GR dan SD. Khusus pada tegakan mangrove pada tapak RH yang menyimpan TBC yang relatif rendah, bisa menjadikan bahan evaluasi bahwa jenis tersebut kemungkinan kurang sesuai untuk tapak pada lokasi ini, dan secara umum di pantai selatan Pulau



Gambar 2. Total karbon tersimpan dan pembagiannya di atas dan di bawah permukaan tanah (sampai dengan kedalaman 60 cm) pada areal rehabilitasi pesisir selatan Pulau Jawa

Figure 2. Total carbon storage and its above- and belowground (up to 60 cm depth) partition in the south coastal rehabilitation area of Java Island

Keterangan: AV: tegakan *Avicennia*, RH: tegakan *Rizophora*, MX: mangrove campuran, SD: lahan sedimen, GR: lahan rumput, CS; tegakan *C. equisetifolia*

Remark: AV: *Avicennia* stand, RH: *Rizophora* stand, MX: mix mangrove stand, SD: sediment/mudflat, GR: grassland, CS: *C. equisetifolia* stand

Jawa (lihat juga pada Budiadi et al. 2016). Sebagian besar simpanan karbon pada tapak yang tergenang atau bertutupan mangrove merupakan kandungan di bawah tanah, khususnya berupa karbon organik tanah/COT (atau *soil organic carbon*, SOC). Pada tegakan mangrove, proporsi COT terhadap total karbon tersimpan adalah 84,30%, 94,33% dan 67,48% pada tutupan AV, RH dan MX. Sebaliknya, pada tapak pasir dengan tegakan CS, simpanan karbon dalam COT hanya 45,58%, dan sebagian yang lain tersimpan dalam biomasa di atas tanah (AGC) yaitu 47,41% dan akar (BGC) yaitu 7,11%. Simpanan karbon pada pesisir pantai selatan Jawa ini jauh lebih rendah daripada stok karbon di Gulf of California yaitu maksimal 272,7 Mg C/ha, dengan kecenderungan kandungan COT yang hampir sama, khususnya pada lahan mangrove (Ochoa-Gomez et al. 2019).

Selain masalah perbedaan bahan induk tanah atau kondisi endapan pesisir, tapak kering berpasir

dengan tegakan *C. equisetifolia* perlu mendapat perhatian karena sebagian besar simpanan karbon berada pada biomasa hidup, khususnya di atas tanah. Simpanan karbon semacam ini kurang stabil jika terjadi gangguan terhadap tegakan atau eksploitasi, sejumlah besar karbon akan hilang atau menjadi emisi. Berbeda dengan lahan pasir, sebagian besar karbon pada tapak yang secara periodik tergenang tersimpan di dalam tanah, dengan laju dekomposisi biomasa yang rendah, sehingga memperlambat proses pelepasan karbon ke atmosfer. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang menyatakan bahwa perbedaan paling signifikan antara simpanan karbon ekosistem mangrove dengan hutan daratan adalah adanya kandungan karbon organik dalam tanah yang sangat berbeda dengan tanah mineral (Kauffman et al. 2011; Yong et al. 2011). Karbon organik tanah menyimpan lebih lama dan lebih banyak karbon dibandingkan dengan gabungan karbon yang ada di atmosfer dan pada vegetasi (Donovan 2013).

Kesimpulan

Tidak banyak kajian tentang potensi simpanan karbon pada lahan rehabilitasi pesisir selatan Pulau Jawa dan perannya dalam mendukung mitigasi perubahan iklim. Penelitian ini menunjukkan bahwa potensi simpanan karbon pada lahan pesisir selatan Pulau Jawa relatif besar, namun terdapat variasi kondisi yang besar antar tapak. Pada tapak basah, dimungkinkan karbon tersimpan lebih besar daripada yang diperkirakan melalui penelitian ini, karena pendugaan hanya dilakukan hingga kedalaman 60 cm saja. Status simpanan karbon yang berbeda pada kelompok berbagai tapak (khususnya lahan basah/tergenang dan tanah kering berpasir) tersebut membutuhkan perhatian yang seksama dalam penanganan dan pelestariannya. Sebagai alternatif, untuk meningkatkan serapan dan simpanan karbon, maka perlu dilakukan regenerasi buatan, peningkatan biodiversitas, pencegahan abrasi pantai, serta tindakan proteksi terhadap kerusakan dan eksploitasi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dari Kelompok Mahasiswa Pemerhati Mangrove UGM (KP3 Mangrove), dan secara khusus kepada Sdr. Enggal Primananda, Sdr. Zinda Rahma, Sdr. Habib Hasani dan Sdr. Tri Dodi Hermawanto atas bantuan pada saat pengambilan data, analisis dan persiapan penulisan artikel ini.

Daftar Pustaka

- Agustin YL, Muryono M, Purnobasuki H. 2011. Estimasi Stok Karbon Pada Tegakan Pohon *Rhizophora stylosa* Di Pantai Talang Iring, Pamekasan Madura. Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Alongi DM, Murdiyarso D, Fourqurean JW, Kauffman JB, Hutahaean A, Crooks S, Wagey T. 2016. Indonesia's Blue Carbon : A Globally Significant and Vulnerable Sink for Seagrass and Mangrove Carbon. *Wetlands Ecology and Management* 24: 3 – 13.
- Andhikari S, Baral H. 2018. Governing Forest Ecosystem Services for Sustainable Environmental Governance : A Review. *Environments* 5(5): 1-13.
- Ati RNA, Rustam A, Kepel TL, Sudirman N, Astrid M, Daulat A, Mangindaan P, Salim HL, Hutahaean A. 2014. Stok Karbon dan Struktur Komunitas Mangrove sebagai Blue Carbon di Tanjung Lesung, Banten. *Segara* 10: 119 - 127.
- Baderan DWK. 2017. Serapan Karbon Hutan Mangrove Gorontalo. Deepublish. Yogyakarta, Indonesia.
- Bismark M. 2011. Prosedur Operasi Standar (SOP) Untuk Survei Keragaman Jenis Pada Kawasan Konservasi. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim dan Kebijakan Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan. Bogor.
- Bismark M, Subiandono E, Heriyanto NM. 2008. Keragaman dan Potensi Jenis Serta Kandungan Karbon Hutan Mangrove di Sungai Subelen Siberut, Sumatera Utara. *Jurnal Penelitian Hutan Dan Konservasi Alam* 3: 297 – 306.
- Budiadi, Nurjanto HH, Hardiwinoto S, Primananda E. 2016. Strategi Pemilihan Jenis Tanaman untuk Mendukung di Muara Sungai Progo. *Jurnal Manusia dan Lingkungan* 23: 349 – 359.
- Cahyawati R. 2013. Pengaruh Pengelolaan Hutan Mangrove Terhadap Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat Di Dusun Baros, Desa Tirtohargo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul. Tesis, S2 Magist. Prnc. Kota & Daerah, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Chave C, Coomes D, Jansen S, Lewis SL, NG, Zanne AE. 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters* 12: 351-366.
- Donato DC, Kauffman JB, Murdiyarso D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. 2012. Mangrove adalah Salah Satu Hutan Terkaya Karbon di Kawasan Tropis. *CIFOR Brief* 12: 1-12.
- Donovan P. 2013. Measuring Soil Carbon Change: A Flexible, Practical, Local Method. soilcarboncoalition.org/files/MeasuringSoilCarbonChange.pdf. Diakses Januari 2017.
- Dung LV, Tue NT, Nhuan MT, Omori K. 2016. Carbon Storage in a Restored Mangrove Forest in Can Gio Mangrove Forest Park, Mekong Delta, Vietnam. *Forest Ecology and Management* 380: 31 – 40.
- Eid EM, Shaltout KH. 2016. Distribution of Soil Organic Carbon in the Mangrove *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. along the Egyptian Red Sea Coast. *Regional Studies in Marine Science*, 76 –82.
- Finesso GM. 2012. Mangrove Diandalkan Menyerap Karbon. <http://sains.kompas.com/read/2012/10/08/16085720/Mangrove.Diandalkan.Menyerap.Karbon>. Diakses Maret 2016.
- Heriyanto NM, Subiandono E. 2012. Komposisi dan Struktur Tegakan, Biomasa dan Potensi Kandungan Karbon Hutan Mangrove di Taman Nasional Alas Purwo. *Penelitian Hutan Dan Konservasi Alam* 9: 23 – 32.
- Ilmiliyana A, Muryono M, Purnobasuki H. 2012. Estimasi Stok Karbon pada Tegakan Pohon *Rhizophora stylosa* di Pantai Camplong, Sampang-Madura. Fakultas Biologi ITS. Surabaya, Indonesia.
- Kauffman JB, Donato DC. 2012. Protocols for the Measurement, Monitoring and Reporting of Structure, Biomass and Carbon Stocks in Mangrove Forests. Working Paper 86 CIFOR.

- Kauffman JB, Heider C, Cole TG, Dwire KA, Donato DC. 2011. Ecosystem Carbon Stocks of Micronesian Mangrove Forests. *Wetlands* **31**: 343 – 352.
- Ketterings Q, Coe R, Van Noordwijk M, Ambagau Y, Palm C. 2001. Reducing Uncertain the Use of Allometric Biomass Equation for Predicting Above Ground Tree Biomass in Mixed Secondary Forest. *Forest Ecology and Management* **146** : 199–209.
- Komiyama A, Ong JE, Pongparn S. 2008. Allometry, Biomass and Productivity of Mangrove Forests : A Review. *Aquatic Botany* **89**: 128 – 137.
- Lestari D. 2015. Garis Pantai Indonesia Terpanjang ke Dua di Dunia. <http://www.antaranews.com/berita/487732/garis-pantai-indonesia-terpanjang-kedua-di-dunia>. Diakses Maret 2016.
- Lugina M, Ginoga KL, Wibowo A, Bainnaura A, Partiani T. 2011. Prosedur Operasi Standar (SOP) untuk Pengukuran Stok Karbon di Kawasan Konservasi. <http://ceserf-ito.puslitsosekhut.web.id>. Diakses Januari 2017.
- Mandari DZ, Gunawan H, Isda MN. 2016. Penaksiran Biomassa dan Karbon Tersimpan pada Ekosistem Hutan Mangrove di Kawasan Bandar Bakau Dumai. *Jurnal Riau Biologia* **1** (3) : 17 – 23.
- Manuri S, Brack C, Rusolono T, Noor'an F, Verchot L, Maulana SI, Adinugroho WS, Kurniawan H, Sukisno DW, Kusuma GA, Budiman A, Anggono RS, Siregar CA, Onrizal, Yuniati D, Soraya E. 2017. Effect of species grouping and site variables on aboveground biomass models for lowland tropical forests of the Indo-Malay region *Annals of Forest Science* **74**: 23.
- McLeod E, Chmura GL, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte CM, Silliman BR. 2011. A Blueprint for Blue Carbon : Toward an Improved Understanding of the Role of Vegetated Coastal Habitats in Sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment* **9**: 552 – 560.
- Noor YR, Khazali M, Suryadipura INN. 1999. Panduan Pengenalan Mangrove di Indonesia (3rd ed.). PHKA/WI-IP. Bogor, Indonesia.
- Nugroho AW. 2013. Pengaruh Komposisi Media Tanam Terhadap Pertumbuhan Awal Cemara Udang (*Casuarina equisetifolia* var. *Incana*) pada Gumuk Pasir Pantai. *Indonesian Forest Rehabilitation Journal* **1**: 113 – 125.
- Nurjanto HH, Suhardi, Djulianto S. 2009. Tanggapan Semai Cemara Udang (*Casuarina equisetifolia* var. *Incana*) Terhadap Cekaman Salinitas dan Frekuensi Penyiraman pada media Pasir Pantai. Hal 176-183. *Prosiding Seminar Nasional Silvikultur Rehabilitasi Lahan : Pengembangan Strategi Untuk Mengendalikan Tingginya Laju Degradasi Hutan*. Yogyakarta.
- Ochoa-Gomez JG, Lluch-Cota SE, Rivera-Monroy VH, Lluch-Cota DB, Troyo-Dieguez E, Oechel W, Serviere-Zaragoza E. 2019. Mangrove wetland productivity and carbon stocks in an arid zone of the Gulf of California (La Paz Bay, Mexico). *Forest Ecology and Management* **442**: 135-147
- Paper C, Ministry MK, Affairs M, Ministry AD, Affairs M, Ministry TK, Affairs M. 2014. Blue Carbon Stock of Mangrove Ecosystem in Nusa Penida , Bali. In 12th Biennial Conference of Pan Ocean remote Sensing Conference (PORSEC 2014). Bali, Indonesia.
- Pearson T, Walker S, Brown S. 2005. Sourcebook for Bio Carbon Fund Projects. Prepared for BioCarbon Fund of World Bank. <https://www.winrock.org/document/sourcebook-for-land-use-land-use-change-and-forestry-projects/>. Diakses Januari 2017.
- Perera KARS, Amarasinghe MD. 2019. Carbon sequestration capacity of mangrove soils in microtidal estuaries and lagoons: A case study from Sri Lanka. *Geoderma* **347**: 80-89
- Purnobasuki H. 2012. Pemanfaatan Hutan Mangrove sebagai Penyimpan Karbon. *Buletin PSL Universitas Surabaya*, **28** : 3 - 5.
- Rajiman, Yudono P, Sulistyaningsih E, Hanudin E. 2008. Pengaruh Pembenahan Tanah terhadap Sifat Fisika Tanah dan hasil bawang Merah pada Lahan Pasir Pantai Bugel Kabupaten Kulon Progo. *Agrin* **12**: 67 – 77.
- Rustam A, Kepel T, Blue S, Di C, Lesung T. 2014. Stok Karbon dan Struktur Komunitas Mangrove Sebagai Blue Carbon di Tanjung Lesung , Banten. *Segara* **10**: 119 – 127.
- Samantha G. 2013. Terbaru : Panjang Garis Pantai Indonesia Capai 99.000 Kilometer. <http://nationalgeographic.co.id/berita/2013/10/terbaru-panjang-garis-pantai-indonesia-capai-99000-kilometer>. Diakses Maret 2017.
- Setiawan N. 2013. Analisis Kesesuaian Habitat Mangrove pada Kawasan Mangrove Buatan di Baros, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Universitas Gadjah Mada. Skripsi. Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Setiyowati, D., Ayub, A. F., dan Zulkifli, M. 2016. Statistik Sumberdaya Laut dan Pesisir. https://www.bps.go.id/website/pdf_publicasi/Statistik-Sumber-Daya-Laut-dan-Pesisir-2016_rev.pdf. Diakses Maret 2017.
- Setyawan AD, Wuryatno I, Wiryanto, Winarno K, Susilowati A. 2005. Mangrove plants in coastal area of Central Java: 2. Floristic composition and vegetation structure. *Biodiversitas* **6**(3): 194-198.
- Singh YP, Singh G, Sharma DK. 2011. Ameliorative Effect of Multipurpose Tree Species Grown on Sodic Soils of Indo-Gangetic Alluvial Plains of India. *Arid Land Research and Management* **25**: 55 – 74.
- Sukri, Yeni S. 2016. Sistem Informasi Geografis Budidaya Ikan Lele di Kawasan Wisata Kampung Lele Kampar Riau. *Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi UNIVRAB* **1** (1):2477-2062.
- Supriyadi S. 2008. Kandungan Bahan Organik sebagai Dasar Pengelolaan Tanah di Lahan Kering Madura. *E-Biomedik* **5**: 176 – 183.
- Sutaryo D. 2009. Penghitungan Biomassa Sebuah pengantar untuk studi karbon dan perdagangan karbon. *Wetlands International Indonesia Programme*. Bogor.

- Tangketasik A, Wikartini NM, Soniari NN, Narka IW. 2012. Kadar Bahan Organik Tanah pada Tanah Sawah dan Tegalan di Bali serta Hubungannya dengan Tekstur Tanah. *Agrotrop* 2: 101 – 107.
- Tuheteru FD, Mahfudz. 2012. Ekologi, Manfaat dan Rehabilitasi Hutan Pantai Indonesia. Balai Penelitian Kehutanan Manado. Manado, Indonesia.
- Wang F, Xu X, Zou B, Guo Z, Li Z, Zhu W. 2013. Biomass Accumulation and Carbon Sequestration in Four Different Aged *Casuarina equisetifolia* Coastal Shelterbelt Plantations in South China. *PLoS ONE* 8 (10) : 2 – 8.
- Wang G, Guan D, Peart MR, Chen Y, Peng Y. 2013. Ecosystem Carbon Stocks of Mangrove Forest in Yingluo Bay, Guangdong Province of South China. *Forest Ecology and Management* 310 : 539 – 546.
- Yong Y, Baipeng P, Guangcheng C, Yan C. 2011. Processes of Organic Carbon in Mangrove Ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* 31: 169 – 173.