

BUNKER OKSIGEN DAN KARBON (BOK) DI LINGKUNGAN SEKOLAH SEBAGAI PENYIMPAN KARBON, MANFAAT, DAN NILAI EKONOMINYA

[Bunker of Oxygen and Carbon (BOC) in School Environment as Carbon Storage, Benefits, and Its Economic Values]

Suyadi^{1*}, Venny Handayani², Agustina Fina², Wira Sudirja²

¹Pusat Penelitian Biologi-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jl. Raya Jakarta-Bogor Km. 46, Cibinong, Bogor, 16911

²SMA Negeri 3 Merauke, Jalan Kamizaun, Jl. Garuda Mopah Lama, Rimba Jaya, Merauke, Papua ,99615

*Kontributor utama dan corresponding author
email: pedhetsuyadi@gmail.com, suya009@lipi.go.id

ABSTRACT

The impacts of pollution and climate change occurred in global and local communities, including at school environment. Uncomfortable school environment due to pollution and school damage due to sea-level rise interferes with learning processes and reduces students' academic performance. A new approach of a school greening programme called Bunkers of Oxygen and Carbon (BOCs) was developed in a public school (SMA Negeri 3 Merauke) in Merauke, Papua using a thematic approach to mitigate pollution and climate change. The research showed that carbon storage of BOCs is mean 74 Mg ha^{-1} . This is equal with carbon dioxide equivalent (CO_2e) of mean $271 \text{ Mg CO}_2\text{e ha}^{-1}$. The capacity of BOCs as carbon storage can be optimized due to the age of vegetation in BOCs is only four years old, and below ground carbon stock was measured only up to 50 cm depth. The amount of carbon stock in BOCs was influenced by vegetation health (tree density and canopy coverage) and vegetation structure (tree diameter and height) in the BOCs ($r^2 = 0.56$, $p = 0.001$). The mean economic value of carbon stocks in the BOCs was US \$ 189 billion ha^{-1} . This economic value may underestimate as many benefits and functions of the BOCs were excluded from the calculation. BOCs have ecological functions as a habitat for many wildlife species, various ecosystem services, recreational areas, aesthetic values, oxygen supply, and a place to improve creativity and as natural laboratories for practice and learning from nature. Therefore, the development of BOCs in the school environment across Indonesia is important as the functions and benefits are crucial to mitigate pollution and climate change, improve the learning process and the quality of national education.

Keywords: carbon stocks, school greening, pollution, climate change

ABSTRAK

Dampak polusi dan perubahan iklim telah dirasakan oleh masyarakat global dan lokal termasuk di lingkungan sekolah. Rasa tidak nyaman akibat polusi hingga kerusakan bangunan dan fasilitas sekolah akibat kenaikan permukaan air laut mengganggu aktivitas belajar dan menurunkan kemampuan belajar siswa. Sebuah pendekatan baru untuk program penghijauan di lingkungan sekolah yaitu Bunker Oksigen dan Karbon (BOK) telah dikembangkan di lingkungan SMA Negeri 3 Merauke, Papua menggunakan pendekatan tematik untuk mitigasi polusi dan perubahan iklim. Penelitian menunjukkan bahwa BOK mampu menyimpan karbon rata-rata 74 Mg ha^{-1} atau setara dengan $271 \text{ Mg CO}_2\text{e ha}^{-1}$. Kapasitas BOK dalam menyimpan karbon masih dapat terus meningkat mengingat umur vegetasi baru empat tahun dan pengukuran karbon di bawah permukaan tanah hanya dilakukan pada kedalaman hingga 50 cm. Jumlah stok karbon di dalam BOK dipengaruhi oleh kesehatan vegetasi (kepadatan pohon dan tutupan kanopi) dan struktur vegetasi (diameter dan tinggi pohon) yang ada di dalam BOK ($r^2 = 0.56$, $p = 0.001$). Rata-rata nilai ekonomi stok karbon di dalam BOK adalah US \$ 189 juta ha^{-1} . Nilai ekonomi tersebut masih minimal karena banyak fungsi dan manfaat lain dari BOK yang belum diperhitungkan. BOK memiliki fungsi ekologis sebagai habitat berbagai jenis hewan liar, berbagai jasa ekosistem, tempat rekreasi, nilai estetika, penyuplai oksigen, dan sebagai tempat berkreasi dan belajar (laboratorium alam). Dengan demikian pengembangan BOK di lingkungan sekolah di Indonesia sangat baik karena fungsi dan manfaatnya tersebut penting untuk mitigasi polusi dan perubahan iklim serta untuk meningkatkan efektivitas proses belajar-mengajar sehingga kualitas pendidikan nasional meningkat.

Kata kunci: stok karbon, penghijauan sekolah, polusi, perubahan iklim

PENDAHULUAN

Parameter utama perubahan iklim seperti kenaikan suhu dan permukaan air laut (*sea level rise*) masih terus terjadi. Permukaan air laut (*sea level*) meningkat $1 - 8 \text{ mm y}^{-1}$ atau rata-rata $3,4 \text{ mm y}^{-1}$ dan diproyeksikan akan terus meningkat antara 0,2 hingga 2,0 m pada tahun 2100 (Church dan White 2011; IPCC 2013). Suhu meningkat antara $0,47 - 0,99^\circ\text{C}$ (rata-rata $0,67^\circ\text{C}$) dan diprediksi akan terus

meningkat hingga mencapai lebih dari 5°C pada tahun 2100 (IPCC 2013; Sujatmiko dan Ihsaniyat 2018; Abdulla 2020).

Salah satu faktor yang menyebabkan perubahan iklim adalah emisi gas rumah kaca atau polusi. Emisi gas rumah kaca di Indonesia meningkat dari 1000,4 Mt.CO₂e pada tahun 2000 menjadi 1844,3 Mt.CO₂e pada tahun 2014 (Republic of Indonesia, 2017). Emisi gas rumah kaca umumnya berasal dari

*Kontributor Utama

*Diterima: 24 Januari 2021 - Diperbaiki: 7 November 2020 - Disetujui: 8 Juni 2021

aktivitas transportasi dan industri, namun di Indonesia 59,2% emisi tahunan gas rumah kaca berasal dari perubahan tutupan dan penggunaan lahan (*land use and land cover change*) (*Ministry of Environment and Forestry*, 2017).

Dampak polusi dan perubahan iklim telah dirasakan di berbagai sektor seperti kehutanan, pertanian, kelautan, dan lain-lain mulai dari skala lokal seperti lingkungan sekolah hingga global. Polusi dan perubahan iklim berdampak buruk pada ekosistem terestrial seperti hutan dan penurunan biodiversitas (Dejene 2018; Penuelas *et al.*, 2018; Nunez *et al.*, 2019), menurunkan produktivitas pertanian dan kesejahteraan petani (Karimi *et al.*, 2018; Sujatmiko dan Ihsaniyati 2018; van Meijl *et al.*, 2018; Aryal *et al.*, 2020), dan menyebabkan kerusakan di laut dan ekosistem pesisir seperti mangrove (Babcock *et al.*, 2019; Duke 2020; Lovelock and Ruth 2020). Polusi dan perubahan iklim juga sudah mengganggu aktivitas masyarakat termasuk proses belajar-mengajar di sekolah akibat ketidaknyamanan gedung dan fasilitas sekolah yang rusak akibat kenaikan muka air laut, banjir rob, dan lain sebagainya (Marfai *et al.*, 2014; Gultom *et al.*, 2018). Polusi udara juga menyebabkan penurunan performa kognitif siswa akibat gangguan pada otak (Zhang *et al.*, 2018). Peningkatan polusi udara juga berkorelasi dengan rendahnya tingkat kehadiran siswa, rendahnya kesehatan, dan tingginya jumlah siswa yang gagal dalam ujian (Mohai *et al.*, 2011).

Berbagai upaya dari skala lokal, nasional, hingga internasional terus dilakukan untuk mengurangi polusi (emisi) dan untuk mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Salah satu upaya komunitas internasional untuk mitigasi dan adaptasi perubahan iklim adalah penurunan emisi atau polutan melalui program *Reducing Emissions from Deforestation and Degradation* (REDD+). Indonesia memiliki target menurunkan emisi gas rumah kaca secara sukarela sebesar 29% dan jika mendapat bantuan dunia internasional target penurunan gas rumah kaca adalah 41% pada tahun 2030 (*Government of Indonesia*, 2016; Tacconi dan Muttaqin, 2019). Beberapa aksi sebagaimana tertuang di dalam Rencana Aksi Nasional untuk menurunkan emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) adalah restorasi dan rehabilitasi ekosistem, pengembangan hutan kemasyarakatan (*sosial forestry*), pembuatan kawasan lindung, dan pencegahan dan penanggulangan kebakaran hutan (Tacconi dan Muttaqin, 2019).

Upaya restorasi dan rehabilitasi yang dilakukan selama ini lebih fokus pada kawasan konservasi (seperti taman nasional, hutan lindung) dan kawasan ekosistem esensial (seperti gambut dan mangrove). Tujuan restorasi dan rehabilitasi tersebut adalah mitigasi perubahan iklim dan polusi melalui penyerapan dan penyimpanan karbon di vegetasi atau di atas permukaan tanah (*aboveground carbon*

stock) dan di tanah atau di bawah permukaan tanah (*belowground carbon stock*). Namun, upaya restorasi dan rehabilitasi ekosistem urban seperti penghijauan (*urban greening program*) terutama di lingkungan sekolah dan area publik lainnya belum mendapat perhatian. Penelitian terdahulu menekankan pentingnya *urban greening program* untuk mitigasi dan adaptasi perubahan iklim, namun diperlukan kebijakan pemerintah dan dukungan data dan informasi ilmiah (Mees dan Driesssen, 2011; Mabon dan Shih, 2018). Data dan informasi tentang manfaat, fungsi, dan kapasitas restorasi dan rehabilitasi ekosistem urban di lingkungan sekolah dan area publik untuk mitigasi polusi dan perubahan iklim masih sangat terbatas. Selain itu, keterlibatan seluruh komponen masyarakat termasuk sekolah (guru dan siswa) dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim di daerah pemukiman masih minim (Hughes *et al.*, 2018). Oleh karena itu, selain data dan informasi ilmiah, diperlukan juga suatu pendekatan baru yang inovatif dan kreatif sehingga menarik masyarakat termasuk para siswa dan guru untuk berpartisipasi dalam upaya mitigasi melalui penghijauan di lingkungannya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengungkap kapasitas Bunker Oksigen dan Karbon (BOK) di lingkungan sekolah dalam menyimpan karbon, manfaat lain, dan nilai ekonominya. BOK adalah suatu pendekatan baru untuk penghijauan di lingkungan sekolah (*school greening program*) menggunakan pendekatan tematik sesuai dengan kebutuhan dan kreatif yang menarik siswa untuk berpartisipasi dalam kegiatan penghijauan sekolah. Penelitian menerapkan metode plot, sampling tanah menggunakan *core*, dan CN analyzer Yanaco 1000. Hasil penelitian bermanfaat untuk membantu sekolah-sekolah, masyarakat, dan pemerintah untuk melakukan penghijauan di lingkungannya dengan menggunakan pendekatan BOK sehingga lingkungan menjadi nyaman, sehat, dan proses belajar mengajar lebih optimal. Penerapan BOK di sekolah-sekolah juga bisa menjadi cara baru dalam mengurangi polutan dan mitigasi perubahan iklim.

BAHAN DAN CARA KERJA

Lokasi Penelitian dan Desain BOK

Penelitian ini dilaksanakan di lingkungan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 3 Merauke, Papua ($8^{\circ}31'53.0''\text{LS}$ $140^{\circ}25'07.3''\text{BT}$). Secara administratif sekolah ini terletak di Kecamatan Merauke, Kabupaten Merauke, Propinsi Papua, Indonesia. SMA Negeri 3 Merauke dipilih sebagai lokasi penelitian karena beberapa alasan berikut: 1) sekolah tersebut mengalami permasalahan lingkungan seperti peningkatan suhu udara, banjir, kekeringan, dan kurangnya ketersediaan air bersih serta rentan terhadap kenaikan air laut (*sea level*

*rise) dan banjir rob; 2) terletak di kawasan perkotaan (*urban area*) dengan aktivitas pembangunan dan transportasi cukup tinggi sehingga rentan terhadap dampak polusi udara; 3) pembangunan infrastruktur dan pembukaan lahan untuk perkebunan dan pertanian mulai beralih ke Indonesia bagian timur termasuk Kabupaten Merauke. Dengan kondisi tersebut di atas maka SMA Negeri 3 Merauke dapat merepresentasikan kondisi umum sekolah-sekolah di Indonesia yang mengalami gangguan penurunan kualitas lingkungan dan berdampak pada kenyamanan dan kualitas belajar siswa.*

Pengembangan BOK dan penanaman pohon di dalam BOK dilakukan pada tahun 2016 di atas lahan berukuran total 6.655 m^2 atau 13,6% dari total luas lahan sekolah (48.960 m^2). BOK didesain dan dibangun di sekeliling sekolah dengan konsep tematik seperti lahan ekowisata, toga, kolam cinta, dan hutan mini sekolah (Gambar 1). Konsep tematik ini menyesuaikan dengan kondisi

lingkungan fisik sekolah (topografi, lansekap, hidrologi, geomorfologi, dan lain-lain) dan kebutuhan atau fungsi. Jenis pohon dan jarak tanam pohon di dalam BOK juga disesuaikan dengan tema BOK, estetika, dan fungsinya.

Vegetasi di dalam BOK memiliki struktur yang bervariasi (Tabel 2). Secara umum vegetasi di dalam BOK memiliki rata-rata diameter pohon 18,6 cm, rata-rata tinggi pohon 8,6 m, dan basal area 0,6 m^2 . BOK 5 dan 6 memiliki struktur vegetasi (diameter dan tinggi pohon) paling besar dan didominasi oleh jenis sengon (*Albizia chinensis*) dengan INP mencapai 72,2 % (Tabel 2). BOK 1 dan 2 memiliki struktur vegetasi (diameter dan tinggi pohon) paling kecil, namun memiliki keragaman jenis yang tinggi. Berbeda dengan yang lain, BOK 3 dan 4 di dominasi oleh trembesi (*Samanea saman*) yang memiliki ukuran diameter dan tinggi pohon sedang (Tabel 2).



Sumber gambar: SMA Negeri 3 Merauke

Gambar 1. Desain BOK di lingkungan Sekolah Menengah Atas Negeri 3 Merauke, Papua. (*Design of BOC in school environment of SMA Negeri 3, Merauke, Papua*)

Pengambilan data dan sampel

Pengambilan data dan sampel dilakukan dengan menggunakan plot berukuran $20 \times 20 \text{ m}^2$ sebanyak 6 plot. Metode *purposive random sampling* digunakan untuk menentukan lokasi plot agar mewakili seluruh BOK yang ada di lingkungan sekolah. Data yang dikumpulkan dari dalam plot adalah jenis pohon, diameter pohon, tinggi pohon, dan tutupan kanopi (*canopy coverage*). Diameter pohon diukur menggunakan meteran pada ketinggian 1,3 m dari permukaan tanah. Tinggi pohon diukur menggunakan tongkat pengukur. Tutupan kanopi diambil menggunakan foto kanopi yang diambil di sembilan titik di dalam setiap plot. Selanjutnya, foto-foto kanopi tersebut diproses menggunakan perangkat lunak ImageJ (di download dari <http://imagej.nih.gov/ij/download.html>) untuk menghitung presentasi tutupan kanopi.

Sampel tanah diambil di dalam setiap plot menggunakan *core* dengan diameter dua inchi (5,8 cm). Panjang core atau kedalaman sampel adalah 50 cm di bawah permukaan tanah. Sampel tanah kemudian dipotong-potong menjadi 5 bagian dengan panjang setiap bagian adalah 10 cm. Sampel ditimbang dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 60°C hingga kering (berat sampel konstan), selanjutnya sampel tersebut dihaluskan menggunakan mortar. Sampel yang telah halus ditimbang sebanyak ± 40 gram dan dimasukan ke CN analyzer Yanaco JMA 1000, Japan untuk dianalisis kadar (%) karbon (C) nya.

Analisis data

Paramater vegetasi yang dianalisis meliputi kerapatan pohon, struktur vegetasi (rata-rata diameter pohon, rata-rata tinggi pohon, basal area), tutupan kanopi (*canopy coverage*), dominasi, frekuensi, dan Indek Nilai Penting (INP). Indek Nilai Penting dihitung sebagai berikut: $\text{INP} = \text{RDi} + \text{RFi} + \text{RCi}$, di mana RDi adalah kerapatan relatif, RFi adalah frekuensi relatif, dan RCi adalah penutupan relatif. Kesehatan vegetasi yang ada di dalam BOK dihitung berdasarkan kriteria baku sesuai dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 201 Tahun 2004 dengan parameter kerapatan pohon dan tutupan kanopi.

Jumlah stok karbon yang disimpan di biomassa pohon di atas permukaan tanah dihitung menggunakan sebuah *generic (universal) allometric equation* (Chave *et al.*, 2005). Chave allometric equation dipilih karena studi terdahulu menunjukkan bahwa *allometric equation* ini menghasilkan *uncertainty* yang lebih rendah dibanding dengan

generic (universal) allometric equation lain (Suyadi *et al.*, 2020). Selanjutnya biomassa tersebut dikonversi menjadi karbon di atas permukaan tanah (vegetasi) menggunakan *generic wood carbon fraction*: 0,5 (Kauffman dan Donato, 2012). Karbon pada bibit, anakan, dan batang roboh (*woody debris*) tidak diperhitungkan karena berdasarkan pengamatan lapangan tidak terdapat banyak. Penghitungan karbon di bawah permukaan tanah juga mengikuti rumus yang dikembangkan oleh Kauffman and Donato (2012). Valuasi ekonomi stok karbon dilakukan mengikuti formula yang dikembangkan oleh Jerath *et al.* (2016). Valuasi ekonomi ini hanya untuk stok karbon yang dikonversi menjadi karbon dioksida ekuivalen (CO_2e) sesuai standar internasional dimana nilai setiap Mg CO_2e adalah US\$ 45 (Jerath *et al.* 2016).

Data dianalisis secara deskriptif dan menggunakan linear regression untuk mengetahui hubungan antara stok karbon di atas permukaan tanah dengan stok karbon di bawah tanah serta hubungan stok karbon dengan kedalaman tanah. Selain itu, penelitian juga menggunakan *Structural equation models* (SEM) untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi stok karbon di atas permukaan tanah seperti indek kesehatan vegetasi dan struktur vegetasi yang terdiri dari diameter dan tinggi pohon. Faktor-faktor tidak langsung yang menjadi penentu indek kesehatan vegetasi juga dapat dihitung menggunakan SEM.

HASIL

Struktur dan kesehatan vegetasi dalam BOK

Hasil penelitian mencatat sebanyak tujuh jenis pohon yang ditanam di dalam BOK (Tabel 1). Sengon (*Albizia chinensis*) merupakan jenis yang pa ling dominan (49,1%), diikuti oleh trembesi (*Samanea saman*) (30,0%) dan pulai (*Alstonia Scholaris*) (13,6%). Selain itu terdapat juga jenis yang umum tumbuh di daerah pesisir yaitu mangrove (*Avicennia eucalyptifolia*) dengan dominasi sebesar 10,3% dan jenis pohon yang banyak tumbuh di dataran rendah hingga dataran tinggi yaitu beringin (*Ficus benjamina*) dengan dominasi sebesar 0,6%. Mangrove memiliki rata-rata diameter dan basal area paling besar, sedangkan yang terkecil adalah beringin (Tabel 1).

Tabel 1. Jenis dan struktur (diameter, tinggi dan basal area) pohon yang ditanam di dalam BOK yang dikembangkan di lingkungan sekolah untuk menyimpan karbon. [*Species and structure (diameter, height, and basal area) of trees planted in the BOKs developed in school environment as carbon storage*].

No	Jenis pohon (<i>Tree species</i>)	Rata-rata diameter pohon (cm) (<i>Mean tree diameter</i>)	Rata-rata tinggi pohon (cm) (<i>Mean tree high</i>)	Basal area (m ²)
1	Sengon (<i>Albizia chinensis</i>)	21,6	10,2	0,040
2	Trembesi (<i>Samanea saman</i>)	17,9	9,5	0,028
3	Mahoni (<i>Swietenia mahagoni</i>)	13,0	8,4	0,016
4	Beringin (<i>Ficus benjamina</i>)	3,6	2,8	0,001
5	Kelapa (<i>Cocos nucifera</i>)	8,9	1,9	0,008
6	Pulai (<i>Alstonia Scholaris</i>)	8,9	4,1	0,007
7	Mangrove (<i>Avicennia eucalyptifolia</i>)	34,4	11,5	0,093

Table 2. Struktur vegetasi di dalam BOK yang dikembangkan di lingkungan sekolah untuk menyimpan karbon. (*Characteristics of vegetation in BOKs developed in school environment as carbon storage*).

No BOK	Rata-rata diameter pohon (cm) (<i>Mean diameter</i>)	Rata-rata tinggi pohon (m) (<i>Mean tree high</i>)	Jumlah Jenis (<i>Number of species</i>)	Jenis dominan (<i>Dominant species</i>)	Frekuensi relatif (%) (<i>Relative frequency</i>)	Dominasi relatif (%) (<i>Relative dominancy</i>)	INP relatif (%) (<i>Relative Important index</i>)
1	11,7	6,1	6	<i>Albizia chinensis</i>	44,4	92,6	60,5
2	14,5	8,5	5	<i>Albizia chinensis</i>	48,1	69,6	55,3
3	16,6	10,9	4	<i>Samanea saman</i>	81,3	81,7	81,4
4	17,8	8,0	2	<i>Samanea saman</i>	68,2	92,9	76,4
5	25,9	9,6	4	<i>Albizia chinensis</i>	54,5	53,2	54,1
6	25,9	9,6	2	<i>Albizia chinensis</i>	66,7	83,3	72,2

Hasil analisis vegetasi menunjukkan bahwa rata-rata kerapatan pohon di dalam BOK yaitu 529 pohon ha^{-1} , masuk kedalam kategori “sedang”, sedangkan rata-rata tutupan kanopi di dalam BOK masuk kategori tinggi (79,21%). Seluruh BOK memiliki tutupan kanopi yang tinggi, namun kerapatan pohnnya masuk ke dalam kategori ja-

rang (*sparse*) dan sedang (Tabel 3). Tidak ada satupun BOK yang memiliki kerapatan pohon dengan kategori rapat (*dense*). Jika mengacu pada Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 201 Tahun 2004 tentang Kriteria Baku Kerusakan Hutan, maka kondisi kesehatan vegetasi di seluruh BOK masuk kedalam kategori “baik” (Tabel 3).

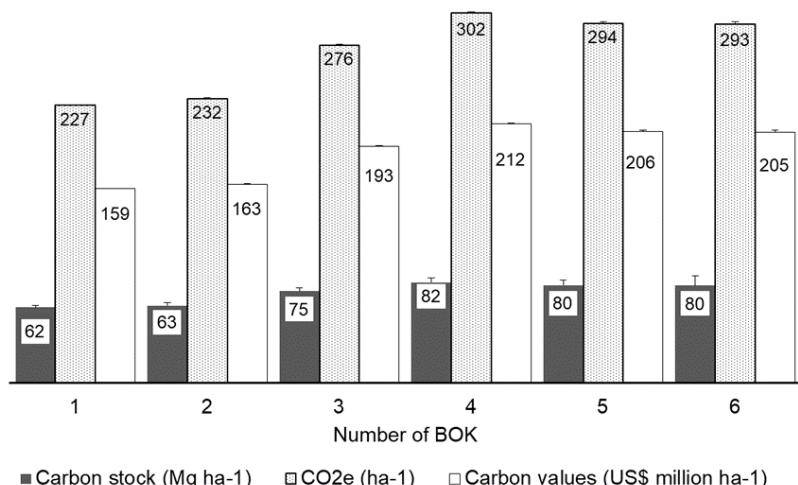
Tabel 3. Kesehatan vegetasi yang ada di dalam BOK yang dikembangkan di lingkungan sekolah untuk menyimpan karbon. (*Vegetation health of BOKs developed in school environment as carbon storage*).

No BOK	Tutupan kanopi (%) (<i>Canopy coverage</i>)	Kelas tutupan (<i>Coverage class</i>)	Kerapatan (pohon/ha) (<i>Tree density</i>)	Kelas Kerapatan (<i>Density class</i>)	Kesehatan vegetasi (<i>Vegetation health</i>)
1	77,55	Tinggi/high	675	Sedang/medium	Baik/good
2	75,49	Tinggi/high	675	Sedang/medium	Baik/good
3	75,72	Tinggi/high	800	Sedang/medium	Baik/good
4	78,58	Tinggi/high	550	Sedang/medium	Baik/good
5	84,99	Tinggi/high	275	Jarang/sparse	Baik/good
6	78,62	Tinggi/high	225	Jarang/sparse	Baik/good

Stok karbon dalam BOK, faktor yang mempengaruhi, dan nilai ekonominya

Hasil analisis karbon menunjukkan bahwa rata-rata BOK mampu menyimpan total karbon sebesar 74 Mg ha^{-1} . Sebanyak 57% (rata-rata 42,39 Mg ha^{-1}) karbon disimpan di atas permukaan tanah atau di vegetasi (*aboveground carbon*) dan 43% (rata-rata 31,38 Mg ha^{-1}) disimpan di bawah permukaan

tanah (*belowground carbon*). Jumlah karbon yang disimpan oleh masing-masing BOK bervariasi, mulai yang tertinggi yaitu BOK 4 dengan total stok karbon 82 Mg ha^{-1} dan terendah yaitu BOK 1 yaitu 62 Mg ha^{-1} (Gambar 2). Stok karbon di atas permukaan tanah (vegetasi) tidak berkorelasi secara nyata dengan stok karbon di bawah permukaan tanah ($r^2 = 0,22, p = 0,02$).

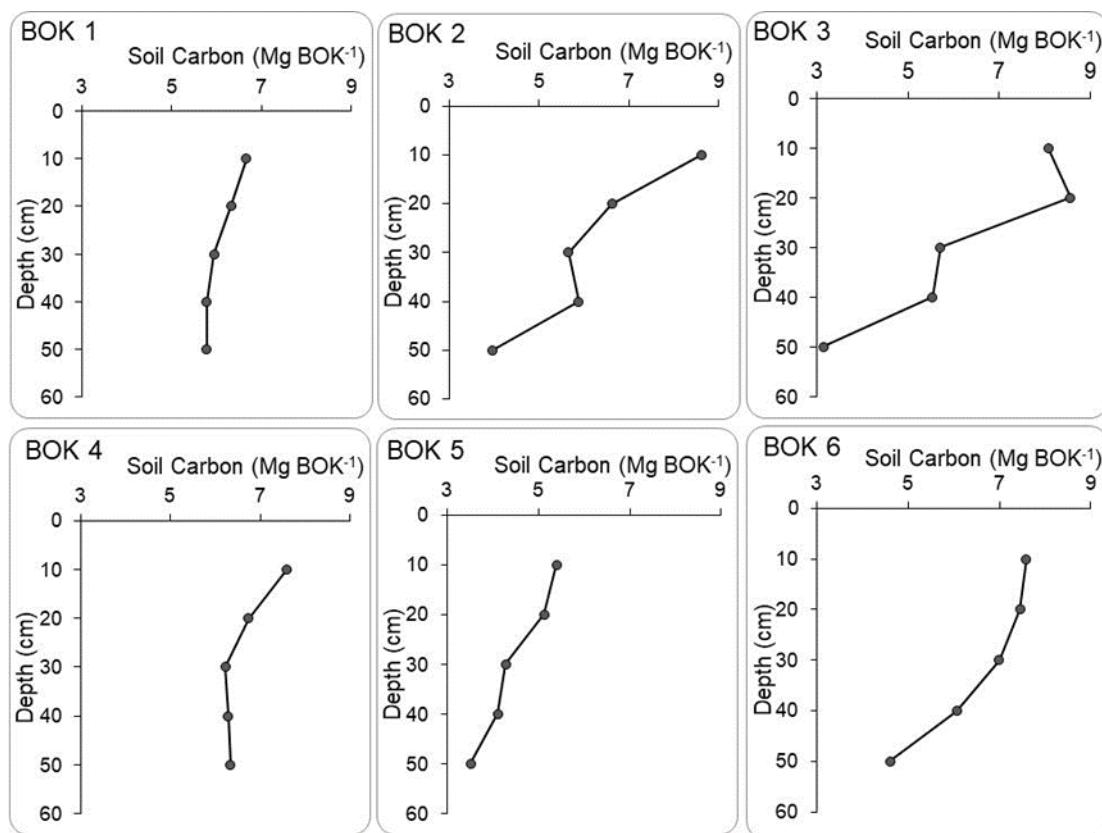


Gambar 2. Stok karbon, karbondioksida ekuivalen (CO_2e), dan nilai ekonomi masing-masing BOK yang dikembangkan di lingkungan sekolah. (*Carbon stocks, carbon dioxide equivalent (CO_2e), and economic value of BOKs developed in school environment*).

Rata-rata stok karbon di dalam BOK setara dengan 271 Mg CO₂e ha⁻¹. Kemampuan setiap BOK dalam menyerap karbodioksida (CO₂e) bervariasi mulai dari 227 Mg CO₂e ha⁻¹ hingga 301 MgCO₂e ha⁻¹ (Gambar 2) bergantung pada struktur dan kesehatan vegetasi (Tabel 2 dan 3). Vegetasi lebih banyak menyerap karbodioksida (155,6 Mg CO₂e ha⁻¹) dibanding dengan di bawah permukaan tanah (115,2 Mg CO₂e ha⁻¹). Mengikuti prosedur penilaian ekonomi yang dijelaskan dalam Jerath *et al.* (2016), maka rata-rata nilai ekonomi stok karbon di dalam BOK adalah US \$ 189 juta ha⁻¹. Nilai ekonomi terendah adalah US \$ 159 juta ha⁻¹ yaitu BOK 1 dan 2 dan nilai ekonomi tertinggi adalah US \$ 212 juta ha⁻¹ (BOK 4). Nilai ekonomi karbon di atas permukaan tanah 35% (US \$ 28 juta ha⁻¹) lebih tinggi di banding dengan nilai karbon di

bawah permukaan tanah atau *soil carbon* yang hanya US \$ 80,62 juta ha⁻¹.

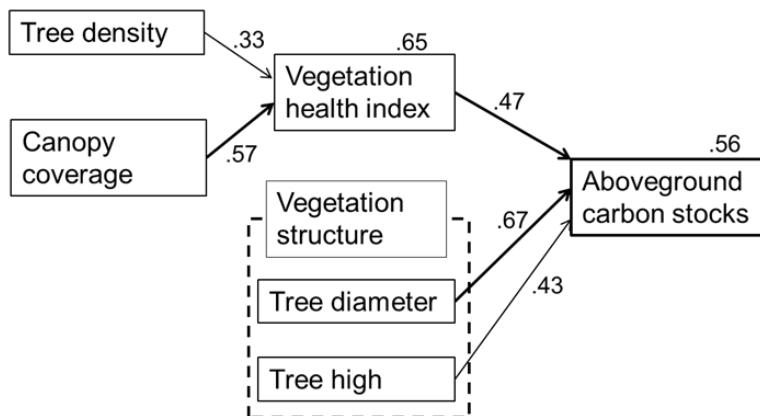
Lapisan tanah paling atas/*top soil* (kedalaman 0–10 cm) menyimpan stok karbon paling tinggi (rata-rata $43 \pm 1,1$ Mg ha⁻¹) dan lapisan di bawahnya (kedalaman 11–20 cm) menyimpan stok karbon rata-rata $39 \pm 1,8$ Mg ha⁻¹. Sedangkan tanah pada kedalaman 21–30 cm, 31–40 cm, dan 41–50 cm secara konsisten menyimpan karbon antara 31 hingga 32 Mg ha⁻¹. Meskipun stok karbon di bawah permukaan tanah menurun sejalan dengan bertambahnya kedalaman tanah ($r^2 = 0,85$, $p = 0,01$), namun profil stok karbon dibawah permukaan tanah di setiap lapisan BOK bervariasi (Gambar 3). Contoh, lapisan 31–40 cm pada BOK 2 dan lapisan 21–30 cm pada BOK 3 lebih besar dibanding dengan lapisan tanah yang ada di atasnya (Gambar 3).



Gambar 3. Profil stok karbon di bawah permukaan tanah pada enam BOK (BOK 1 - 6) yang dikembangkan di lingkungan sekolah. (*Profile of below ground carbon stocks of six BOKs developed in school environment*).

Hasil analisis menggunakan *structural equation model* menunjukkan bahwa indek kesehatan vegetasi ($p = 0,01$), struktur vegetasi yaitu diameter pohon ($p = 0,001$) dan tinggi pohon ($p = 0,01$) dapat menjelaskan hingga 56% variasi stok karbon di atas permukaan tanah pada seluruh BOK ($r^2 = 0,56$, $p = 0,001$) (Gambar 4). Sedangkan indek kesehatan vegetasi dijelaskan hingga 65% oleh tutupan kanopi dan kepadatan pohon BOK ($r^2 = 0,65$, $p = 0,001$). Rata-rata stok karbon di atas permukaan tanah tertinggi adalah BOK 5 dan 6 ($51 \pm 4,36 \text{ Mg ha}^{-1}$),

diikuti oleh BOK 3 dan 4 yaitu $45 \pm 1,47$ Mg ha⁻¹, dan terendah adalah BOK 1 dan 2 yaitu $31 \pm 1,09$ Mg ha⁻¹. Stok karbon tersebut berkorelasi dengan rata-rata diameter pohon yaitu 25,9 cm dan indek kesehatan vegetasi 96% untuk BOK 5 dan 6, rata-rata diameter pohon 17,2 cm dan indek kesehatan vegetasi 76% untuk BOK 3 dan 4, dan rata-rata diameter pohon 13,1 cm dan indek kesehatan vegetasi 72% untuk BOK 1 dan 2.



Gambar 4. Hasil *structural equation model* menunjukkan pengaruh kesehatan vegetasi dan struktur vegetasi terhadap stok karbon di atas permukaan tanah. (*Structural equation model showing influence of vegetation health and vegetation structure to aboveground carbon stocks*).

PEMBAHASAN

LEMBAH KASAR
BOK sebagai penyimpan karbon dan faktor yang mempengaruhinya

Penelitian ini menunjukkan bahwa pembangunan BOK di lingkungan sekolah cukup baik dalam menyerap dan menyimpan karbon (Gambar 2 dan 3). Jumlah stok karbon yang disimpan di dalam BOK jauh lebih besar dibanding dengan stok karbon yang disimpan di hutan di daerah subtropis yang hanya $40,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Suyadi *et al.*, 2020). Stok karbon di dalam BOK juga masih setara dengan stok karbon di hutan mangrove di pulau-pulau kecil yaitu antara $57 - 189 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Suyadi *et al.*, *in review*). Kapasitas BOK dalam menyimpan karbon masih bisa terus meningkat mengingat vegetasi di dalam BOK masih berumur empat tahun dan pengambilan sampel karbon di bawah tanah hanya dilakukan sampai kedalaman 50 cm. Jika vegetasi di BOK sudah mencapai umur yang optimal mungkin stok karbon di dalam BOK dapat setara dengan hutan alami yang dikenal kaya akan stok karbon seperti hutan mangrove di pulau-pulau berukuran besar yang mencapai 993 Mg ha^{-1} hingga 1.023 Mg ha^{-1} (Suyadi 2020; Donato *et al.*, 2011).

Penyerapan karbondioksida (CO_2 e) oleh BOK di lingkungan sekolah jauh lebih tinggi di banding

dengan hutan mangrove di kawasan subtropis yang hanya mampu menyerap 148 Mg CO₂e ha⁻¹ (Suyadi, 2018). Selain itu, nilai ekonomi stok karbon BOK di lingkungan sekolah juga lebih tinggi dari nilai ekonomi stok karbon di hutan mangrove di daerah subtropis yang hanya antara US \$6,367 ha⁻¹ – US \$11,824 ha⁻¹ (Suyadi, 2018). Nilai ekonomi stok karbon di dalam BOK setara dengan nilai ekonomi stok karbon di pulau-pulau kecil seperti Pulau Ambon (Maluku), Pulau Moa (Maluku Barat Daya), dan Maluku Utara: Pulau Imam, Pulau Dadawe, dan Pulau Bori-Bori (Prayudha *et al.*, 2019; Suyadi *et al.*, 2019, *in review*;). Nilai ekonomi BOK tersebut akan lebih tinggi jika stok karbon di bawah tanah diukur lebih dalam lagi dan usia vegetasi juga sudah optimal. Stok karbon di bawah tanah jumlahnya jauh lebih tinggi dibanding karbon di atas permukaan tanah yaitu mencapai 70% dari total stok karbon (Bulmer *et al.* 2016a, b; Radabaugh *et al.*, 2018). Nilai ekonomi BOK akan lebih besar jika nilai-nilai dari parameter lain seperti nilai sosial, nilai jasa eksosistem (*ecosystem services*), dan nilai estetika diperhitungkan (Barbier *et al.*, 2011; Jerath *et al.*, 2016).

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi BOK dalam penyimpanan karbon di atas permukaan

tanah yaitu kesehatan vegetasi dan struktur vegetasi: diameter dan tinggi pohon di dalam BOK (Gambar 4). Hal serupa juga terjadi pada stok karbon di hutan mangrove yang di pengaruhi oleh jumlah cabang-cabang yang mati dan rata-rata luas tutupan kanopi (Suyadi, 2018). Hal tersebut menunjukkan bahwa menjaga kesehatan vegetasi dan meningkatkan kompleksitas vegetasi di dalam BOK sangat penting untuk meningkatkan kapasitas dan efektivitas BOK dalam menyerap dan menyimpan karbon. Kesehatan vegetasi bukan hanya ditentukan oleh kepadatan pohon dan tutupan kanopi saja seperti yang tercantum di dalam baku mutu kerusakan mangrove (Kepmen Lingkungan Hidup RI No. 201 Tahun, 2004) tetapi juga faktor lain seperti jumlah cabang-cabang yang mati. Selain itu, faktor lain yang mungkin mempengaruhi stok karbon di atas permukaan tanah adalah umur vegetasi, jenis vegetasi (primer/sekunder), dan nutrisi tanah (Jones et al., 2019).

Fungsi dan manfaat lain BOK serta prospek pengembangannya

BOK juga memiliki fungsi ekologis yang baik karena jenis-jenis pohon yang ada di dalam BOK merupakan jenis tumbuhan asli Papua (*native species*) yang telah dikenal memiliki fungsi ekologis yang baik, misalnya beringin (*Ficus sp.*) merupakan tempat bergantung berbagai satwa liar seperti burung, primata, mamalia, dan berbagai serangga (Moe et al., 2011; Bortolamiol et al., 2014; Christyanti, 2014; Daru et al., 2015; Santy et al., 2015; Matthews et al., 2017). Berdasarkan hasil observasi di lapangan ditemukan berbagai jenis burung, musang, dan serangga berada di vegetasi dalam BOK. Beringin (*Ficus sp.*) juga merupakan sumber pakan utama untuk primata seperti siamang dan orangutan serta mamalia arboreal lainnya (Christyanti, 2014; Santy et al., 2015).

BOK juga memiliki jasa ekosistem dan nilai sosial-estetika yang penting untuk kehidupan manusia khususnya di lingkungan sekolah. Mangrove yang merupakan salah satu penyusun vegetasi BOK memiliki potensi dalam mencegah intrusi air laut dan sebagai pengikat sedimen (Suyadi, 2012; Damayanti et al., 2020). Berbagai jenis serangga pollinator juga berasosiasi dengan beringin (*Ficus sp.*) (Moe et al., 2011; Darwell et al., 2018). Vegetasi juga berperan penting sebagai penyuplai oksigen yang dibutuhkan manusia (Bayu et al., 2014; Andryani, 2020). Beberapa pohon yang ditanam di dalam BOX seperti mahoni (*Swietenia mahagoni*) dan trembesi (*Samanea saman*) dikenal sebagai penghasil oksigen yang baik mencapai 78 kg hari^{-1} atau $28,48 \text{ ton tahun}^{-1}$ (Dinas Lingkungan Hidup Buleleng, 2020). Vegetasi juga berfungsi untuk mengurangi polusi udara dan polusi suara (Karlinasari et al., 2012; Al-Hakim, 2014). Dengan berkurangnya polusi udara, polusi suara,

dan suplai oksigen yang cukup akan meningkatkan kenyamanan di sekolah sehingga kualitas belajar mengajar meningkat (Kumaat, 2012).

Luas lahan untuk BOK di SMAN 3 Merauke adalah 6.615 m^2 (0,66 ha). Jika rata-rata stok karbon di dalam BOK adalah 74 Mg ha^{-1} (Gambar 2 dan 3), maka stok karbon di SMA tersebut adalah 49 Mg atau setara dengan $179 \text{ Mg CO}_2\text{e}$ dengan nilai ekonomi US\$ $12.537 \text{ tahun}^{-1}$ (Rp. 175.517.418). Minimal luas lahan sekolah sesuai standar Permendiknas No. 40 tahun 2008 adalah 353 m^2 atau $2,30 \text{ m}^2$ per peserta didik. Jika mengacu pada Undang-undang No 26 Tahun 2007 tentang alokasi 30% untuk ruang terbuka hijau, maka seluruh sekolah di Indonesia yang berjumlah 218.239 (<http://statistik.data.kemdikbud.go.id/index.php/page>) dapat menyimpan karbon sebanyak 171 Mg atau setara dengan $626 \text{ Mg CO}_2\text{e}$ dengan nilai ekonomi US\$ 43.802 (Rp. 613.223.369). Nilai ekonomi tersebut memang tidak besar, namun pengembangan BOK di sekolah-sekolah sangat penting karena fungsi dan jasa ekosistem BOK jauh lebih besar. Sebuah studi menunjukkan adanya korelasi antara sarana dan prasarana termasuk ruang terbuka hijau dengan mutu pembelajaran atau nilai rata-rata ujian nasional (Rahmah et al., 2013). Pengembangan BOK di lingkungan sekolah lebih menarik bagi siswa karena dikemas secara tematik, kreatif, atraktif, dan integratif sesuai dengan keinginan dan kebutuhan. Sebagai contoh, BOK dapat diintegrasikan dengan berbagai kegiatan sekolah dan kegiatan ekstrakurikuler seperti laboratorium alam, pecinta alam, olahraga, seni kreatif, rekreasi, dan lain sebagainya.

BOK mampu menyimpan karbon hingga 84% lebih tinggi dibanding dengan pendekatan penyimpanan karbon menggunakan mangrove di daerah yang beriklim sub-tropis (Bulmer et al., 2016; Suyadi et al., 2020). Kemampuan BOK dalam menyimpan karbon setara dengan pendekatan penyimpanan karbon menggunakan mangrove di pulau-pulau kecil di daerah beriklim tropis (Suyadi et al., in review). Namun, kemampuan BOK dalam menyimpan karbon masih dibawah kemampuan penyimpanan karbon menggunakan vegetasi lahan basah (mangrove primer dan gambut) di pulau-pulau besar di daerah beriklim tropis (Donato et al., 2011; Suyadi 2020).

KESIMPULAN

Bunker Oksigen dan Karbon (BOK) merupakan pendekatan kreatif untuk program penghijauan di lingkungan sekolah (*school greening program*). BOK dapat didisain secara atraktif menggunakan pendekatan tematik sehingga menarik bagi siswa dan dapat mendorong mereka untuk terlibat dalam pembuatan dan perawatan BOK. BOK juga dapat

dintegrasikan dengan berbagai kebutuhan dan kegiatan sekolah dan siswa. BOK terbukti dapat menyimpan karbon sebesar rata-rata 74 Mg ha⁻¹ dan memiliki nilai ekonomi rata-rata US \$ 189 billion ha⁻¹. Selain itu, BOK juga memiliki fungsi ekologis sebagai habitat berbagai jenis satwa liar, jasa ekosistem (*ecosystem services*), edukasi, rekreasi, dan estetika. Vegetasi dalam BOK dapat membantu mengurangi polusi dan memberikan rasa nyaman sehingga proses belajar-mengajar dapat berjalan lebih efektif dan performa pendidikan siswa meningkat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Semua penulis menyatakan bahwa Suyadi adalah kontributor utama dalam publikasi karya ilmiah ini. Penulis menyampaikan terima kasih kepada bapak Steven Jois Rumere, S.Pd (Kepala Sekolah SMA Negeri 3 Merauke), kepada para dewan guru dan siswa di SMA Negeri 3 Merauke, dan kepada semua pihak yang telah membantu dan memberikan masukan atau saran dalam pembuatan BOK dan pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulla, F., 2020. 21st century climate change projections of precipitation and temperature in Jordan. *Procedia Manufacturing*, 44, pp. 197–204.
- Al-Hakim, A.H., 2014. Evaluasi efektivitas tanaman dalam mereduksi polusi berdasarkan karakter fisik pohon pada jalur hijau jalan Pajajaran Bogor. *Skripsi*. Departemen arsitektur lanskap, fakultas pertanian, Institute Pertanian Bogor, Indonesia.
- Andryani, A.E., 2020. Analisis ketersediaan ruang terbuka hijau terhadap kebutuhan oksigen di Kecamatan Ponorogo Kabupaten Ponorogo. *Swara Bhumi e-Journal Pendidikan Geografi*, 3(3), pp. 1–9.
- Aryal, J.P., Sapkota, T.B., Khurana, R., Khatri-Chhetri, A., Rahut, D.B., and Jat, M.L., 2020. Climate change and agriculture in South Asia: adaptation options in smallholder production systems. *Environment, Development and Sustainability*, 22, pp. 5045–5075, DOI.org/10.1007/s10668-019-00414-4.
- Babcock R. C., Bustamante R. H., Fulton E. A., Fulton D. J., Haywood M. D. E., Hobday A. J., Kenyon R., Matear R. J., Plagányi E. E., Richardson A. J., and Vanderklift M. A., 2019. Severe continental-scale impacts of climate change are happening now: extreme climate events impact marine habitat forming communities along 45% of Australia's Coast. *Frontiers Marine Science*, 6(411), pp. 1–14, DOI: 10.3389/fmars.2019.00411.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., and Silliman, B. R., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169–193. DOI.org/10.1890/10-1510.1.
- Bayu, P., Suminarty, N. E., dan Sudiarso, 2014. Perencanaan Hutan Kota di Universitas Brawijaya. *Jurnal Produksi Tanaman*, 2(5), pp.427–433.
- Bortolamiol S., Cohen M., Potts K., Pennec F., and Rwaburindore P., 2014 Suitable habitats for endangered frugivorous mammals: small-scale comparison, regeneration forest and chimpanzee density in Kibale National Park, Uganda. *PLoS ONE*9(7), e102177, DOI:10.1371/journal.pone.0102177.
- Bulmer, R. H., Schwendenmann, L., and Lundquist, C. J., 2016a. Allometric models for estimating aboveground biomass, carbon and nitrogen stocks in temperate Avicennia marina forests. *Wetlands*, 36(5), pp. 841–848, DOI: 10.1007/s13157-016-0793-0.
- Bulmer, R. H., Schwendenmann, L., and Lundquist, C., 2016b. Carbon and nitrogen stocks and below-ground allometry in temperate mangroves. *Frontiers in Marine Science*, 3 (150), pp. 1–11, DOI: 10.3389/fmars.2016.00150.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., and Kira, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), pp. 87–99.
- Christyanti, M., 2014. Kompetisi dan Tumpang-tindih Relung antara Siamang (*Sympalangus syndactylus*) dan Mammalia Arboreum Lainnya di Taman Nasional Bukit Barisan Selatan. *Skripsi*. Departemen Biologi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.
- Church, J. A., and White, N. J., 2011. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, 32(4–5), pp. 585–602, DOI:10.1007/s10712-011-9119-1.
- Damayanti, R. Amukti, dan Suyadi, 2020. Potential of mangrove forest vegetation to mitigate sea water intrusion in small island. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 5(2), pp. 75–91, DOI: 10.14203/oldi.2020.v5i2.313.
- Daru, B. H., Yessooufou, K., Nuttman, C., and Abalaka, J., 2015. A preliminary study of bird use of fig *Ficus* species in Amurum Forest Reserve, Nigeria. *Malimbus*, 37, pp. 1–16
- Darwell, C.T., Segar, S.T., and Cook, J.M., 2018. Conserved community structure and simultaneous divergence events in the fig wasps associated with *Ficus benjamina* in Australia and China. *BioMed Central Ecology*, 18(13), pp. 1–16, DOI.org/10.1186/s12898-018-0167-y.
- Dejene W. Sintayehu, 2018. Impact of climate change on biodiversity and associated key ecosystem services in Africa: A systematic review, *Ecosystem Health and Sustainability*, 4(9), pp. 225–239, DOI: 10.1080/20964129.2018.1530054
- Dinas Lingkungan Hidup Buleleng, 2020. *Mari Budayakan Menanam Pohon*. <https://dlh.bulelengkab.go.id/> (diakses 30 Oktober 2020).
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., and Kanninen, M., 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), pp. 293–297, DOI: 10.1038/NGEO1123.
- Duke, N.C., 2020. Mangrove harbingers of coastal degradation seen in their responses to global climate change coupled with ever-increasing human pressures. *CHEC Journal Mangrove Special Issue*. Spring 2020 Issue 30, pp. 19–23.
- Government of Indonesia, 2016. *First Nationally Determined Contribution Republic of Indonesia*. Jakarta.
- Gultom, H., Juhadi, T. dan Aji, A., 2018. Fenomena Banjir Rob di Kota Semarang Sebagai Sumber Belajar. *Edu Geografi*, 6(3), pp. 198–205.
- Hughes, S., Chu, E.K. and Mason, S.G., 2018. *Climate change in cities, Innovation in multi-level governance*. ISBN 978-3-319-65003-6 (eBook). DOI.org/10.1007/978-3-319-65003-6.
- IPCC., 2013. *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Stocker,T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jerath, M., Bhat, M., Rivera-Monroy, V.H., Castañeda-Moya, E., Simard, M. and Twilley, R.R., 2016. The role of economic, policy, and ecological factors in estimating the value of carbon stocks in Everglades mangrove forests, South Florida, USA. *Environmental Science and Policy*,

- 66, pp. 160–169, DOI.org/10.1016/j.envsci.2016.09.005.
- Jones, I.L., DeWalt, S.J., Lopez, O.R., Bunnefeld, L., Pattinson, Z and Dent, H.D., 2019. Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. *Science of the Total Environment*, 697(133987), pp 1–10, DOI.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133987.
- Karimi, V., Karami, E. and Keshavarz, 2018. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), pp. 1–15. DOI.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5.
- Karlinaasari, L., Mariyanti, I., Batubara, H.N., Dhani, R.M. dan Nandika, D., 2012. Evaluasi visual dan karakteristik kecepatan gelombang ultrasonic pohon peneduh di perkotaan dan hutan tanaman. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan*, 5(2), pp. 8–14.
- Kauffman, J. B., and Donato, D., 2012. *Protocols for the Measurement, Monitoring and Reporting of Structure, Biomass and Carbon Stocks in Mangrove Forests*. (No. Working Paper 86). Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Kepmen (Keputusan Menteri) Lingkungan Hidup RI No. 201, 2004. *Tentang Kriteria Baku dan Pedoman Penentuan Kerusakan Mangrove*. Menteri Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia.
- Kumaat, M., 2012. Transportasi dan Polusi pada Kawasan Pendidikan. *TEKNO-SIPIL*, 10(57), pp. 27–32.
- Lovelock, C.E. and Reef, R., 2020. Variable Impacts of Climate Change on Blue Carbon. *One Earth*, 3, pp. 195–211, DOI.org/10.1016/j.oneear.2020.07.010.
- Mabon, L. and Shih, W.Y., 2018. What might 'just green enough' urban development mean in the context of climate change adaptation? The case of Taipei Metropolis, Taiwan. *World Development*, 107, pp. 224–238. DOI.org/10.1016/j.worlddev.2018.02.035.
- Marfai, M. A., Cahyadi, A., dan Kasbullah, A. A., 2014. Dampak bencana banjir pesisir dan adaptasi masyarakat terhadapnya di Kabupaten Pekalongan. *Makalah dalam Pekan Ilmiah Tahunan Ikatan Geograf Indonesia (PIT IGI)* 2014 Universitas Negeri Yogyakarta. Yogyakarta, Indonesia.
- Matthews, T. J., Cottée-Jones, H. E. W., Bregman, T.P., and Whittaker, R.J., 2017. Assessing the relative importance of isolated Ficus trees to insectivorous birds in an Indian human-modified tropical landscape. *Biodiversity Conservation*, 26, pp. 2803–2819, DOI 10.1007/s10531-017-1387-8.
- Mees, H. P. and Driessen, P.P.J., 2011. Adaptation to climate change in urban areas: Climate-greening London, Rotterdam, and Toronto. *Climate Law2*, pp. 251–280, DOI 10.3232/CL-2011-036.
- Ministry of Environment and Forestry, 2017. *Indonesia's Third National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, Jakarta, Indonesia.
- Moe, A.M., Rossi, D. R., and Weiblen, G. D., 2011. Pollinator sharing in dioecious figs (*Ficus*: Moraceae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 103, pp. 546–558.
- Mohai, P., Kweon, B., Lee, S., and Ard.K., 2011. Air Pollution Around Schools Is Linked To Poorer Student Health And Academic Performance. *Health Affairs*, 30(5), pp. 852–862, DOI: 10.1377/hlthaff.2011.0077.
- Nunez, S., Arets, E., Alkemade, R., Verwer, C., and Leemans, R., 2019. Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2 °C enough? *Climatic Change*, 154, pp. 351–365, DOI.org/10.1007/s10584-019-02420-x.
- Peñuelas, J., Sardans, J., Filella, I., Estiarte, M., Llusia, J., Ogaya, R., Carnicer, J., Bartrons, M., Rivas-Ubach, A., Grau, O., Peguero, G., Margalef, O., Pla-Rabés, S., Stefanescu, C., Asensio, D., Preece, C., Liu, L., Verger, A., Rico, L., Barbata, A., Achotegui-Castells, A., Gargallo-Garriga, A., Sperlich, D., Farré-Armengol, G., Fernández-Martínez, M., Liu, D., Zhang, C., Urbina, I., Camino, M., Vives, M., Nadal-Sala, D., Sabaté, S., Gracia, C., and Terradas, J. 2018. Assessment of the impacts of climate change on Mediterranean terrestrial ecosystems based on data from field experiments and long-term monitored field gradients in Catalonia. *Environmental and Experimental Botany*, 152, pp. 49–59. DOI.org/10.1016/j.envexpbot.2017.05.012.
- Radabaugh, K.R., R.P. Moyer, A.R. Chappel, C.E. Powell, I. Bociu, B.C. Clark, and J.M. Smoak, 2018. Coastal blue carbon assessment of mangroves, salt marshes, and salt barrens in Tampa Bay, Florida, USA. *Estuaries and Coasts*, 41(5), pp. 1496–1510, DOI.org/10.1007/s12237-017-0362-7.
- Rahmah, N., Sujanti, S., Waddji, F., dan Rahman, A., 2013. Evaluasi sarana dan prasarana pendidikan terhadap mutu pembelajaran. *Pevote*, 098, pp. 11–21.
- Republic of Indonesia, 2017. *Indonesia Third National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Ministry of Environment and Forestry, Jakarta.
- Santy, D.N.P., Patana, P., dan Jumilawaty, E. 2015. Kelimpahan jenis dan estimasi produktivitas *Ficus* spp. sebagai sumber pakan alami orangutan sumatera (*Pongo abelii*) di Pusat Pengamatan Orangutan Sumatera (PPOS) Taman Nasional Gunung Leuser. *Skripsi*. Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara.
- Sujatmiko, T. and Ihsaniyat, H. 2018. Implication of climate change on coffee farmers' welfare in Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 200(012054), pp. 1–7, DOI: 10.1088/1755-1315/200/1/012054.
- Suyadi; J. Gao; C. J. Lundquist; L. Schwendemann. 2020. Aboveground carbon stocks in rapidly expanding mangroves in New Zealand: regional assessment and economic valuation of blue carbon. *Estuaries and Coasts*, 43, pp. 1456–1469, DOI.org/10.1007/s12237-020-00736-x.
- Suyadi. 2020. Characteristics of mangrove ecosystems in Weda Bay: Environment, Vegetation, and Aboveground Carbon Stocks. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 618(012021), pp. 1–15, DOI:10.1088/1755-1315/618/1/012021.
- Prayudha, B., Y. Tutti, R.S. Utama, U. Yanuarbi, I.B. Vimono, I. Nagib, A. Faricha, Suyadi, J. Renyaan, S. Rahmawati, A. Kusnadi, L. Alifatri, A. Salatalohi, T. dan Triandiza, A.R. Dzumalex. 2019. *Laporan: Studi Baseline Terumbu Karang dan Ekosistem Terkait di Pulau Kei Kecil dan Sekitarnya, Kota Tual dan Kabupaten Maluku Tenggara, Provinsi Maluku*. COREMAP-CTI, Pusat Penelitian Oseanografi LIPI.
- Suyadi, Satioajie, W. N., Leatemia, A. S., Naroli, I., Romdon, A., Ruli, F., Nugroho, D.A., Tala, D., Islami, M.M., Amukti, R., Damayanti, C., Manulang, C. Y., Indrabudi, T., Nasution, A.M., Irawan, A., Matuankota, C., Adji, A.S., Rugebregt, M. J., Alik, R., Pelasula, D., Arfah, H., Littay, C., Opier, R., Patipieolhy, F., Tahalele, L., Irianto, B., and Radjab, A.W., 2019. *Laporan: Monitoring Teluk Ambon Tahun 2019*. Pusat Penelitian Laut Dalam LIPI.
- Suyadi, 2018. Spatial distribution of mangrove in the Auckland Region (1940–2014). *Dissertation*. Environmental Science, Faculty of Science, University of Auckland, New Zealand.
- Suyadi, Prayudha, B., Indrabudi, T., Manulang, C.Y. and Renyaan, J. in review. Mangrove in urban area of small islands: vegetation health, potential, and management challenges. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Paper code: ICOES-OCEAN-05.
- Suyadi, 2012. A Decade of Condition of Mangrove Forest in Ambon Bay, Maluku, Indonesia. *Jurnal Biologi Indonesia*, 8(1), pp. 197–203.
- Tacconi, L. and Muttaqin, M.Z., 2019. Reducing emissions from land use change in Indonesia: An overview. *Forest Policy*

- and Economics, 108, pp. 1–7, DOI: [.org/10.1016/j.fopol.2019.101979](https://doi.org/10.1016/j.fopol.2019.101979).
- Van Meijl, H., Havlik, P., Lotze-Campen, H., Stehfest, E., Witzke, P., Dom'inguez, I. P., Bodirsky, B.L., van Dijk, M., Doelman, J., Fellmann, T., Humpenoder, F., Koopman, J.F.L., Muller, C., Popp, A., Tabeau, A., Valin, H. and van Zeist, W., 2018. Comparing impacts of climate change and mitigation on global agriculture by 2050. *Environmental Research Letters*, 13(064021), pp. 1–20, DOI.org/10.1088/1748-9326/aabdc4.
- Zhang, X., Chen, X. and Zhang, X., 2018. The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(37), pp. 9193–9197, DOI.org/10.1073/pnas.180947411.