

Mangrove adalah salah satu hutan terkaya karbon di kawasan tropis

Daniel C. Donato^a, J. Boone Kauffman^b, Daniel Murdiyarso^c, Sofyan Kurnianto^c, Melanie Stidham^d dan Markku Kanninen^e

Hutan mangrove terdapat di sepanjang garis pantai di kawasan tropis, dan menjadi pendukung berbagai jasa ekosistem, termasuk produksi perikanan dan siklus unsur hara. Namun luas hutan mangrove telah mengalami penurunan sampai 30–50% dalam setengah abad terakhir ini karena pembangunan daerah pesisir, perluasan pembangunan tambak dan penebangan yang berlebihan.^{1–4} Besarnya emisi karbon akibat hilangnya mangrove masih belum diketahui dengan jelas, sebagian karena kurangnya data berskala besar tentang jumlah karbon yang tersimpan di dalam ekosistem ini, khususnya di bawah permukaan.⁵ Dalam penelitian ini kami mengkuantifikasikan simpanan karbon di dalam ekosistem mangrove secara keseluruhan dengan mengukur biomassa pohon dan kayu mati, kandungan karbon tanah dan kedalaman tanah di 25 hutan mangrove di sepanjang kawasan Indo-Pasifik, yang membentang selebar 30° garis lintang dan sepanjang 73° garis bujur, di mana mangrovenya sangat luas dan beragam.^{4,6} Data yang ada menunjukkan bahwa mangrove merupakan salah satu hutan terkaya karbon di kawasan tropis, yang mengandung sekitar 1023 Mg karbon per hektar. Tanah dengan kandungan organik tinggi memiliki kedalaman antara 0,5 m sampai dengan lebih dari 3 m dan merupakan 49–98% simpanan karbon dalam ekosistem ini. Dengan menggabungkan data kami dengan informasi lain yang telah dipublikasikan, kami memperkirakan bahwa deforestasi mangrove menyebabkan emisi sebesar 0,02–0,12 Pg karbon per tahun, yang setara dengan sekitar 10% emisi dari deforestasi secara global, walaupun luasnya hanya 0,7% dari seluruh kawasan hutan tropis.^{6,7}

Deforestasi dan perubahan tata guna lahan saat ini menyebabkan emisi karbondioksida (CO₂) sekitar 8–20% yang bersumber dari kegiatan manusia di tingkat global – menempati posisi kedua setelah pembakaran bahan bakar fosil.^{7,8} Sebuah kesepakatan internasional mengenai iklim baru-baru ini menekankan pentingnya *Reduced Emissions from Deforestation and Degradation* (REDD+) sebagai kunci dan pilihan yang berbiaya relatif rendah untuk mitigasi perubahan iklim; strategi ini bertujuan untuk menjaga simpanan karbon (C) di darat melalui insentif finansial untuk melindungi hutan (misalnya, kredit karbon). REDD+ dan beberapa program serupa menuntut adanya pemantauan yang ketat atas simpanan dan emisi C,^{8,9} yang menggarisbawahi pentingnya estimasi simpanan C secara tepat untuk berbagai tipe hutan, khususnya tipe-tipe yang memiliki cadangan C yang tinggi dan yang mengalami perubahan tata guna lahan yang tak terkendali.¹⁰

Hutan lahan basah tropis (misalnya, lahan gambut) memiliki tanah organik sampai kedalaman beberapa meter dan merupakan salah satu penyimpan C organik terbesar di biosfer daratan.^{11–13} Pandangan yang salah tentang nilai penting lahan gambut dalam kaitannya dengan pemanfaatan lahan dan perubahan iklim telah mendapatkan sorotan sejak 1997, ketika kebakaran gambut dikaitkan dengan kegiatan pembersihan lahan di Indonesia meningkatkan CO₂ atmosfer di Indonesia sebesar 13–40% di atas emisi bahan bakar fosil tahunan global.¹¹ Angka ini menunjukkan betapa pentingnya memberi perhatian khusus terhadap lahan gambut dalam strategi mitigasi perubahan iklim internasional.^{7,13}

a USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station

b USDA Forest Service, Northern Research Station

c Center for International Forestry Research (CIFOR)

d USDA Forest Service, International Programs

e Viikki Tropical Resources Institute (VITRI), University of Helsinki

Dalam wacana tersebut hutan mangrove terlewatkan, padahal keberadaannya di sepanjang pantai sejumlah besar laut utama di 118 negara menambahkan sebesar 30–35% dari luas global hutan lahan basah tropis selain lahan gambut.^{4,6,12} Walaupun mangrove sudah dikenal memberikan berbagai jenis jasa ekosistem, termasuk produksi perikanan dan serat, pengendalian sedimen dan perlindungan pantai dari badai/tsunami,^{2,4} luas kawasan mangrove menurun pesat akibat penebangan untuk perluasan budidaya tambak dan pembangunan infrastruktur.^{2–6} Penurunan luas sebesar 30–50% selama setengah abad terakhir^{1,3} memberikan perkiraan bahwa mangrove secara fungsional akan hilang sekurangnya dalam 100 tahun (rujukan 1,2). Cepatnya kenaikan permukaan laut pada abad 21 juga telah disebut sebagai ancaman utama bagi mangrove,¹⁴ yang telah berinteraksi dengan perubahan permukaan laut masa lampau dengan bergeser menuju ke darat atau ke hulu.¹⁵

Walaupun mangrove diketahui memiliki kemampuan asimilasi dan laju penyerapan C yang tinggi,^{16–22} ternyata data tentang simpanan karbon untuk keseluruhan ekosistem sangat sedikit, yaitu hanya data mengenai emisi C yang terkait dengan konversi lahan. Laporan tentang simpanan C untuk beberapa komponen terutama untuk biomassa pohon juga terbatas^{17,18} namun fakta bahwa tanah mangrove yang dalam kaya kandungan organik^{22–25} menunjukkan bahwa dalam estimasi tersebut sejumlah besar karbon keseluruhan ekosistem justru terlewatkan. Tanah mangrove memiliki lapisan *suboxic* dengan ketebalan berbeda (semula dikenal dengan sebutan ‘gambut’ atau ‘lendut’), yang mendukung berlangsungnya dekomposisi anaerobik dan memiliki kandungan C sedang sampai tinggi.^{16,20,21} Kuantifikasi simpanan C di bawah permukaan pada tanah mangrove sulit untuk dilakukan^{5,21} dan bukan merupakan suatu fungsi yang sederhana untuk mengukur laju perubahan – karena mengharuskan integrasi dari berbagai pengendapan, transformasi dan dinamika erosi selama ribuan tahun yang terkait dengan fluktuasi permukaan laut dan berbagai gangguan yang kadang terjadi.¹⁵ Sejauh ini belum ada penelitian yang telah memadukan simpanan C mangrove yang mencakup wilayah geografis yang luas.

Dalam studi ini kami mengkuantifikasi simpanan C pada ekosistem mangrove di sepanjang jalur wilayah Indo-Pasifik, yang merupakan wilayah sebaran utama mangrove (40% luas global) dengan keragaman yang tinggi.^{4,6} Lokasi penelitian mencakup komposisi tegakan dan tinggi yang bervariasi (Gambar 1, Tabel Tambahan S1), berada pada rentangan 30° garis lintang (8°S–22°U), 73° garis bujur (90°–163° T), dan mencakup wilayah timur Mikronesia (Kosrae); wilayah barat Mikronesia (Yap dan Palau); Sulawesi, Jawa, Kalimantan (Indonesia); dan Sundarbans (Delta



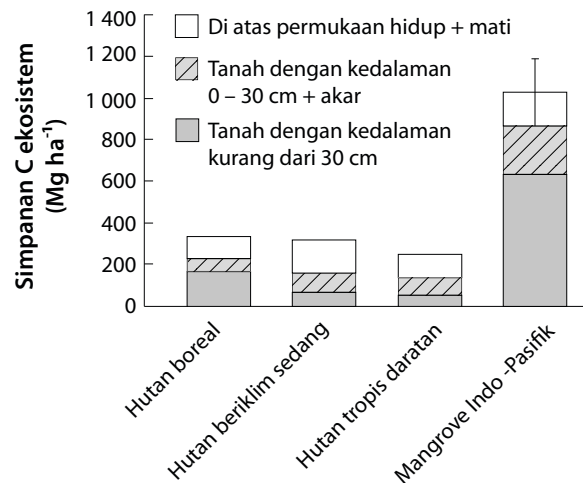
Gambar 1. Contoh mangrove Indo-Pasifik. Contoh yang diambil mencakup kisaran yang luas atas profil tegakan, komposisi dan kedalaman tanah. a) Contoh profil mangrove yang besar dan berkerapatan tinggi didominasi oleh *Bruguiera*, Kalimantan, Indonesia (tinggi tajuk > 15 m, penutupan tajuk > 90%, kedalaman tanah > 3 m). b) Contoh profil mangrove yang kecil dan berkerapatan rendah didominasi oleh *Rhizophora*, Sulawesi, Indonesia (tinggi tajuk < 4 m, penutupan tajuk < 60%, kedalaman tanah 0,35–0,78 m). Mangrove muara dan laut dapat menunjukkan kedua kondisi tersebut (lihat Tabel Tambahan S1)

Gangga-Brahmaputra, Banglades). Di sepanjang jalur pengukuran dari arah laut menuju ke daratan, kami mengombinasikan teknik-teknik biometrik yang sudah ada dan pengambilan contoh tanah untuk menghitung variasi cadangan karbon di atas dan di bawah permukaan sebagai sebuah fungsi jarak dari laut ke arah daratan dari dua macam bentuk geomorfik utama: muara/delta sungai dan laut/pantai. Mangrove muara (n = 10) terletak pada delta aluvial yang luas, sering dengan laguna yang terlindung; mangrove laut (n = 15) terletak di tepi

laut, biasanya berupa pantai pulau-pulau yang dikelilingi terumbu karang di tepinya. Jarak dari laut dan bentuk geomorfik dapat mempengaruhi dinamika C karena adanya perbedaan pergerakan pasang surut (*tidal flushing*) dan nilai penting relatif dari *allochthonous* (sedimen sungai) versus *autochthonous* (produksi serasah dan akar di tumbuhan) yang mengendalikan akumulasi C tanah.^{5,16}

Kami menemukan bahwa mangrove merupakan salah satu hutan yang simpanan karbonnya tertinggi di kawasan tropis (nilai rerata contoh: $1.023 \text{ Mg C ha}^{-1} \pm 88 \text{ s.e.m.}$), dan sangat tinggi dibandingkan rerata simpanan karbon di berbagai tipe hutan lainnya di dunia (Gambar 2). Rerata karbon di mangrove muara sebesar $1.074 \text{ Mg C ha}^{-1} (\pm 171 \text{ s.e.m.})$; sementara untuk mangrove laut sebesar $990 \pm 96 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Cadangan C di atas permukaan nilainya cukup besar (rerata 159 Mg C ha^{-1} , maksimum 435 Mg C ha^{-1}), namun cadangan di bawah permukaan tetap mendominasi, untuk mangrove muara dan laut masing-masing sebesar 71–98% dan 49–90% dari total simpanan (Gambar 2 dan 3). Simpanan C di bawah permukaan berkorelasi positif namun lemah dengan simpanan di atas permukaan ($R^2 = 0,21$ dan $0,50$ masing-masing untuk mangrove muara dan laut). Walaupun cadangan C tanah sedikit meningkat dengan jarak dari laut untuk mangrove laut (karena meningkatnya kedalaman tanah), perubahan cadangan C di atas maupun di bawah permukaan pada gradien jarak ini sangat bervariasi dan secara statistik tidak signifikan (Gambar 3).

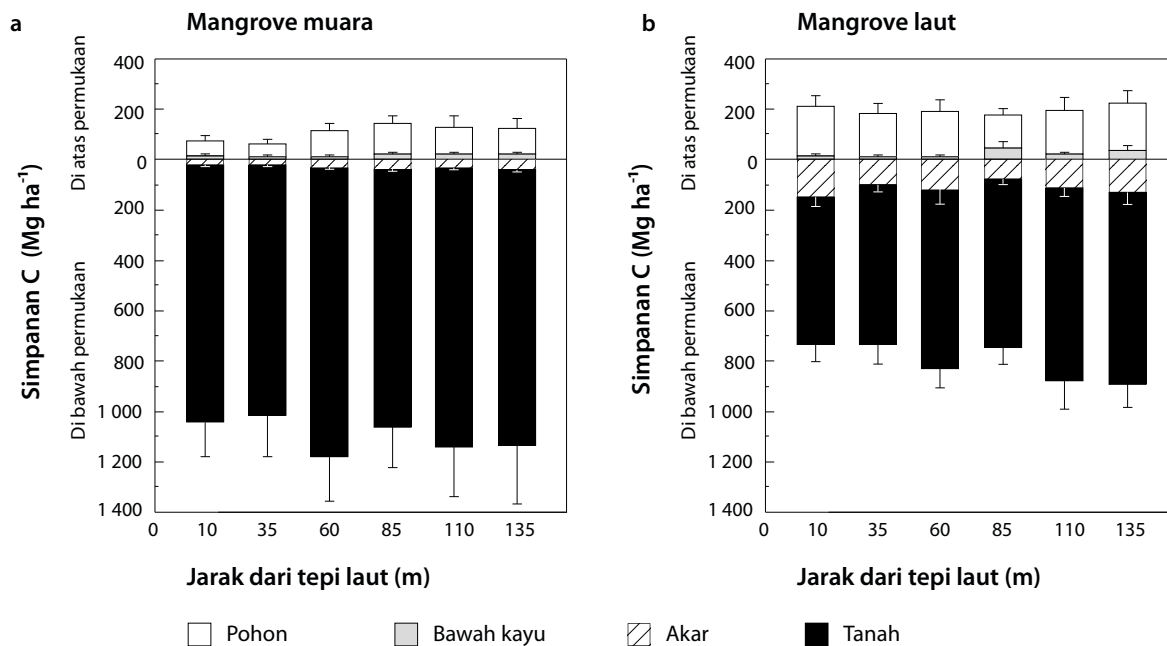
Sejauh ini, kuantifikasi simpanan C di bawah permukaan pada mangrove terhambat oleh kurangnya data tentang kandungan karbon tanah, berat jenis tanah dan kedalaman tanah, serta bagaimana ketiga faktor tersebut bervariasi secara spasial. Kami menemukan kandungan C yang tinggi (% massa kering) di bagian atas profil tanah, yang kemudian menurun di bawah 1 m (Gambar 4a). Kandungan karbon di mangrove muara lebih rendah (rerata = 7,9%) dibandingkan di mangrove laut (rerata = 14,6%). Berat jenis tanah tidak berbeda secara signifikan berdasarkan faktor geomorfis atau jarak dari laut (umumnya $\sim 0,35\text{--}0,55 \text{ g cm}^{-3}$), namun meningkat dengan bertambahnya kedalaman (Gambar 4b). Kombinasi antara kandungan C dan berat jenis tanah menghasilkan rerata kandungan karbon sebesar $0,038 \text{ g C cm}^{-3}$ dan $0,061 \text{ g C cm}^{-3}$ masing-masing untuk mangrove muara dan mangrove laut. Kedalaman total lapisan gambut antara mangrove muara dan mangrove laut juga berbeda (Gambar 4c) dan faktor ini merupakan penyebab adanya variasi simpanan C di bawah permukaan (Gambar 3). Tegakan mangrove muara berada di atas sedimen aluvial yang dalam, umumnya memiliki kedalaman lebih dari 3 m; tegakan mangrove laut memiliki lapisan kaya organik yang jelas yang menyelimuti pasir atau batu karang yang besar, dengan ketebalan lendut meningkat dari rerata 1,2 m ($\pm 0,2 \text{ s.e.m.}$) di laut sampai 1,7 m ($\pm 0,2 \text{ s.e.m.}$) ke arah



Gambar 2. Perbandingan simpanan C mangrove (rerata 95% selang kepercayaan) dengan nilai simpanan berbagai tipe hutan. Nilai rerata simpanan C berdasarkan tipe hutan diperoleh dari rujukan 9, termasuk nilai-nilai acuan untuk pohon, serasah, kayu mati, rasio akar: kanopi dan tanah, dengan asumsi bahwa bagian 30 cm dari atas permukaan memiliki 50% dari semua C yang terdapat di dalam tanah⁹, kecuali untuk hutan boreal (25%). Rerata tiap tipe hutan disajikan untuk memberikan gambaran umum, meskipun masing-masing tipe dapat memiliki simpanan C yang lebih besar atau lebih kecil.^{9,10} Umumnya, 30 cm bagian atas dari C karbon dianggap paling rawan terhadap perubahan pemanfaatan lahan; namun pada tanah-tanah suboxic gambut/lendut, drainase, penggalian dan oksidasi dapat mempengaruhi lapisan yang lebih dalam.²⁹

daratan (4c). Dalam hal simpanan C bawah permukaan keseluruhan, tipisnya kedalaman tanah di mangrove laut sebagian dikompensasi oleh kandungan C organik yang lebih tinggi (Gambar 4a,c).

Data tersebut menunjukkan bahwa tingginya produktivitas dan laju penyerapan C di ekosistem mangrove^{16–22} serta simpanan C yang tinggi, khususnya di bawah permukaan. Tingginya simpanan C per hektar dan distribusinya di seluruh kawasan tropis (luas total 14 juta ha; rujukan 4,6) menunjukkan bahwa mangrove adalah penyimpan C di atas permukaan yang penting secara global. Walaupun contoh-contoh dalam studi kami tidak sepenuhnya mewakili semua jenis mangrove (membuat data ini tidak dapat langsung diberlakukan secara luas), kendala tertentu tentang simpanan C global dapat diperoleh dengan menggabungkan suatu rentang ketidakpastian dari data empiris kami (persentil ke-5 sampai dengan ke-95 dari nilai simpanan C) dengan data global tambahan tentang kandungan C tanah, kedalaman dan biomassa tegakan^{16,17,21,23,24} (lihat Metode dalam Informasi Tambahan). Dengan pendekatan ini diperoleh estimasi C sebesar 4–20 Pg secara global. Tentunya estimasi ini akan disempurnakan



Gambar 3. Simpanan C di atas dan di bawah permukaan di kawasan mangrove Indo-Pasifik, diukur menurut jarak dari tepi laut.

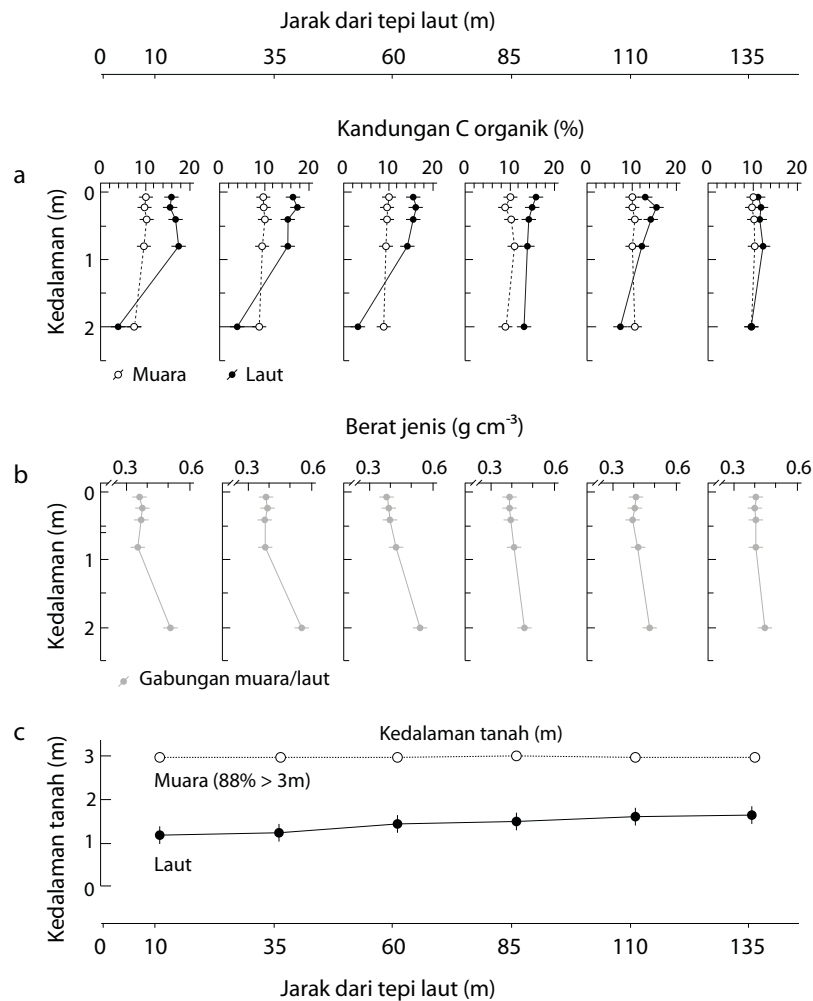
a) Mangrove muara terletak di delta aluvial yang luas. b) Mangrove laut terletak di lingkungan tepian laut - misalnya, pesisir pulau-pulau. Karbon di bawah permukaan mengandung C ekosistem sebesar 71–98% dan 49–90% masing-masing untuk mangrove muara dan mangrove laut. Simpanan karbon secara keseluruhan tidak berbeda secara signifikan dengan jarak dari tepi laut pada kedua lokasi dari rentang contoh yang diambil ($P > 0,10$ untuk simpanan C di atas permukaan, di bawah permukaan dan keseluruhan dengan analisis data fungsional (FDA, lihat Metode); CI 95% untuk laju perubahan semua melintasi nol dan terletak antara -1,2 dan 3,9 MG C ha⁻¹ per meter dari tepi laut).

kemudian, namun hal ini menunjukkan bahwa mangrove menambah simpanan C di hutan lahan basah tropis secara signifikan (misalnya, lahan gambut tropis: ~82–92 Pg C; rujukan 12).

Emisi karbon dari perubahan pemanfaatan lahan mangrove belum dipahami dengan baik. Data kami menunjukkan adanya potensi emisi yang tinggi karena gangguan terhadap simpanan C yang besar. Kondisi keberlanjutan cadangan C di bawah permukaan khususnya masih kurang dimengerti, namun bukti yang ada menunjukkan bahwa pembukaan lahan, drainase, dan/atau konversi menjadi tambak – selain berdampak pada biomassa vegetasi – juga menurunkan C tanah mangrove secara signifikan.^{16,22,26-28} Pada hutan-hutan lahan kering, 30 cm bagian atas tanah umumnya dianggap paling rawan terhadap perubahan pemanfaatan lahan;⁹ namun bagi hutan lahan basah, drainase dan oksidasi tanah yang sebelumnya merupakan lapisan *suboxic* juga dapat mempengaruhi lapisan yang lebih dalam.⁹ Untuk memberikan batasan pada estimasi emisi, kami menggunakan teknik penyebaran ketidakpastian yang sama, dengan menggabungkan nilai simpanan C kami dengan data global lain^{16,17} dan menerapkan serangkaian asumsi tentang pengaruh pemanfaatan lahan terhadap cadangan di atas dan di bawah permukaan (lihat Informasi

Tambahan). Pendekatan ini menghasilkan estimasi sebesar 112–392 Mg C yang dilepaskan per hektar lahan yang dibuka, sebagian besar bergantung pada seberapa besar C tanah dipengaruhi oleh berbagai pemanfaatan lahan yang berbeda. Setelah digabung dengan masukan dari berbagai laju deforestasi mangrove (1–2%; rujukan 1,4) dan luas mangrove global (13,7–15,2 juta ha; rujukan 4,6) yang telah dipublikasikan, estimasi ini memberikan nilai emisi global sekitar 0,02–0,12 Pg C th⁻¹. Laju ini memperbesar angka emisi lahan gambut yang sering dikutip (0,30 Pg C th⁻¹) dan emisi global karena deforestasi (~1,2 Pg C th⁻¹; rujukan 7) meskipun angka ini hanya mencakup kehilangan tegakan pohon dan tidak memperhitungkan pengaruh-pengaruh konversi mangrove yang belum diketahui, seperti penurunan laju penyerapan C, efisiensi penimbunan, dan pembuangan ke laut,^{16,18} dan juga tidak mencakup peningkatan dalam metanogenesis yang umumnya rendah terjadi pada beberapa tanah yang terganggu.^{16,27}

Selain kehilangan tutupan hutan secara langsung, sejumlah kegiatan pemanfaatan lahan juga akan mempengaruhi respon mangrove terhadap kenaikan permukaan laut. Mangrove telah menunjukkan ketahanannya terhadap kenaikan permukaan laut yang cepat (5–15 mm th⁻¹) selama akhir Periode Kuartar yang disebabkan oleh: (1) migrasi



Gambar 4. Sifat-sifat tanah yang menentukan simpanan karbon bawah permukaan di kawasan mangrove Indo-Pasifik.

a) Konsentrasi C tanah lebih besar pada di mangrove laut (rerata=14,6%) dibandingkan mangrove muara (rerata=7,9%) ($P = 0,01$), dan menurun dengan kedalaman ($P < 0,0001$; pengaruh lebih kuat di lokasi laut). Perubahan konsentrasi C seiring dengan jarak ke tepi laut tidak signifikan secara biologis. b) Berat jenis tanah tidak berbeda secara signifikan dengan lokasi ($P = 0,79$); oleh karena itu satu garis menunjukkan kombinasi kedua lokasi. Berat jenis tanah meningkat dengan kedalaman ($P < 0,0001$) namun tidak dengan jarak dari laut ($P=0,20$), dan hubungan interaksi antara jarak * kedalaman tidak signifikan ($P=0,47$). c) Kedalaman tanah meningkat dengan jarak dari arah tepi laut pada tegakan mangrove laut (hasil FDA: $P=0,002$, 95% CI untuk laju perubahan = 21–65 cm peningkatan per 100 m jarak).

ke arah darat, dan (2) perubahan autogenis pada tinggi permukaan tanah melalui produksi bahan organik di bawah permukaan dan/atau sedimentasi.¹⁵ Dengan kondisi kecenderungan perubahan iklim saat ini, permukaan laut diproyeksikan mengalami kenaikan sebesar 18–79 cm dari 1999–2099 (lebih tinggi jika pencairan es berlanjut semakin cepat)^{8,30} yang menunjukkan laju rerata sebesar $\sim 1,8-7,9 \text{ mm th}^{-1}$, sekalipun ada variasi lokal dan waktu yang bersifat linear. Walaupun laju ini bukanlah hal yang belum pernah terjadi sebelumnya, masih belum jelas apakah mangrove saat ini dapat mengimbangi perubahan permukaan laut. Perubahan-perubahan antropogenik dapat membatasi ketahanan di masa mendatang karena kenaikan permukaan laut akibat pembangunan di daerah

pesisir yang menghalangi migrasi ke daerah pedalaman (misalnya, adanya jalan dan infrastruktur), pemanfaatan lahan dataran tinggi yang mengganggu masukan sedimen dan air (misalnya bendungan, pembukaan lahan), dan degradasi mangrove yang menurunkan produktivitas bawah permukaan.¹⁴ Sinergi pemanfaatan lahan dan dampak perubahan iklim menambah ketidakpastian kondisi kelangsungan dan pengelolaan simpanan C di wilayah pesisir.

Masih ada sejumlah ketidakpastian utama yang dihadapi untuk memperbaiki estimasi simpanan C mangrove dan emisi pemanfaatan lahan. Salah satunya adalah variasi geografis kedalaman tanah, sebuah parameter kunci yang

belum diketahui di sebagian besar kawasan.^{5,21} Demikian pula dengan data empiris tentang dampak perubahan pemanfaatan lahan terhadap C tanah yang masih sangat kurang, khususnya untuk lapisan dalam (lihat rujukan 26–28). Estimasi kuantitatif juga dibutuhkan untuk daerah yang dikelilingi oleh mangrove muara dan mangrove laut, yang tidak dibahas dalam kebanyakan analisis kawasan mangrove.^{4,6} Mengingat kedua sistem ini menyimpan C bawah permukaan secara berbeda, data spasial yang lebih baik akan sangat memperbaiki estimasi simpanan C global dan emisi yang disebabkan oleh gangguan alam.

Data kami menunjukkan bahwa pembahasan tentang peran utama hutan lahan basah tropis dalam perubahan iklim secara signifikan dapat diperluas dengan mengikutsertakan mangrove. Lahan gambut di Asia Tenggara saat ini merupakan ekosistem yang diajukan sebagai komponen penting dalam berbagai strategi mitigasi perubahan iklim seperti REDD+ (rujukan 7, 13), dan mangrove memiliki sejumlah ciri yang relevan: tanah kaya organik yang dalam, simpanan C yang sangat tinggi, dan deforestasi/degradasi yang sangat luas, yang berpotensi besar menyebabkan emisi gas rumah kaca. Berbagai jasa ekosistem dan distribusi geografis mangrove yang sudah sangat dikenal^{1–4} menunjukkan bahwa strategi mitigasi ini dapat berfungsi efektif dalam memberikan keuntungan tambahan dan sejumlah peluang REDD+ potensial di berbagai negara tropis. Mengingat pemanfaatan lahan mangrove tidak hanya mempengaruhi tegakan melainkan juga respon ekosistem terhadap kenaikan permukaan laut, upaya untuk menjaga simpanan C ini akan menuntut dua hal: mitigasi *in situ* (misalnya, menurunkan laju konversi) dan fasilitasi adaptasi terhadap kenaikan permukaan laut. Tantangan yang kedua ini sebagian besar bersifat unik bagi pengelolaan hutan pesisir, membutuhkan sejumlah pendekatan berskala daerah aliran sungai (DAS), misalnya lanskap penyangga untuk mengakomodasi migrasi ke daratan jika memungkinkan, menjaga masukan sedimen dari bagian hulu dan menindaklanjuti degradasi produktivitas mangrove dari polusi serta dampak eksogenus lainnya.^{14,15}

Metode

Kami mengambil contoh di 25 lokasi mangrove ($n = 10$ muara, $n = 15$ laut) di sepanjang Indo-Pasifik (8° LS– 22° LU, 90° – 163° BT) dengan menggunakan sebuah jalur yang dimulai dari, dan tegak lurus garis pantai menuju daratan. Untuk memaksimalkan cakupan dan keterwakilan, kami melakukan stratifikasi terhadap contoh pada sejumlah besar rentang profil tegakan, termasuk tegakan rendah dan tanah dangkal (ketinggian tajuk < 4 m atau rerata diameter pohon < 10 cm, kedalaman tanah $< 0,5$ m) sampai dengan tegakan tinggi dan tanah yang dalam (ketinggian tajuk $>$

15 m atau rerata diameter pohon > 20 cm, tanah > 3 m) (Tabel Tambahan S1). Ciri-ciri struktural dari ketinggian pohon dan kedalaman tanah tersebut merupakan penentu utama bagi penyimpanan karbon, bahkan lebih dari faktor gradien lingkungan atau variasi geografis. Titik awal setiap jalur ditentukan secara acak sebelumnya dari citra penginderaan jauh, tetapi juga memperhatikan kendala akses dan kepemilikan lahan. Di dalam enam plot lingkaran contoh yang masing-masing berjarak 25 m di sepanjang masing-masing jalur, kami mengukur biomassa pohon berdiri dan kayu mati di lantai hutan dengan menggunakan teknik standar biometris (survei batang, metode *intersep planar*), dan menerapkan persamaan alometris khusus atau umum berbasis wilayah dan C: konversi biomassa untuk biomassa di atas dan di bawah permukaan. Kami mengukur kedalaman tanah di tiga lokasi sistematis dalam masing-masing plot dengan menggunakan pipa deteksi (*probe*) aluminium secara berurutan (batas inferensi 3 m). Kami mengambil contoh tanah dari masing-masing plot dengan menggunakan *peat auger* berukuran 6,4 cm yang dirancang khusus untuk mengurangi pemadatan tanah. Profil tanah dibagi secara sistematis ke dalam beberapa selang kedalaman dan subcontoh diambil untuk setiap selang. Subcontoh kemudian dikeringkan untuk menstabilkan massa dan ditimbang untuk penentuan berat jenis, kemudian analisis konsentrasi C dilakukan dengan menggunakan metode pembakaran kering (induksi tungku). Standar kesalahan pada simpanan C dalam ekosistem secara keseluruhan dihitung dengan menyebarkan standar kesalahan dari cadangan tiap komponen. Analisis untuk lokasi muara dan laut kami lakukan secara terpisah, dengan memperhatikan perubahan kedalaman tanah dan cadangan C menurut jarak dari arah laut ke daratan, dengan menggunakan analisis data fungsional (regresi pada tingkat lokasi untuk laju perubahan terhadap jarak, diikuti oleh sebuah uji parametrik satu contoh terhadap semua laju perubahan untuk memperoleh kekuatan hubungan positif atau negatif). Kami menggabungkan model regresi efek, mengukur pengaruh tetap kedalaman, jarak dari tepi arah laut, dan bentuk geomorfis, dengan efek acak pada lokasi untuk menghitung ketergantungan di dalam suatu lokasi. Rentang untuk simpanan C global dan laju emisi diperoleh dengan menggunakan persentil ke-5, rerata, atau persentil ke-95 dari estimasi penelitian ini (yang memperhitungkan kemungkinan bahwa biomassa dan cadangan C tanah berbeda secara global dari nilai rerata kami—lebih tinggi atau lebih rendah), dengan berat jenis C tanah yang disesuaikan berdasarkan analisis global¹⁶, dikombinasikan dengan estimasi rendah sampai tinggi tentang estimasi global kawasan mangrove dan laju deforestasi yang telah dipublikasikan.^{1,4,6} Metode secara lengkap dapat dilihat di bagian Suplemen informasi.

Referensi

1. Duke, N. C. dkk. 2007 A world without mangroves? *Science* 317: 4142.
2. Polidoro, B. A. dkk. 2010 The loss of species: Mangrove extinction risk and geographic areas of global concern. *PLoS ONE* 5: e10095.
3. Alongi, D. M. 2002 Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation* 29: 331–349.
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2007 *The World's Mangroves 1980–2005*. FAO Forestry Paper 153. FAO, Rome.
5. Bouillon, S., Rivera-Monroy, V. H., Twilley, R. R., dan Kairo, J. G. 2009 Mangroves, *Dalam: Laffoley, D. dan Grimsditch (penyunting) The Management of Natural Coastal Carbon Sinks* IUCN.
6. Giri, C. dkk. 2011 Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology Biogeography* 20: 154–159.
7. van der Werf, G. R. dkk. 2009 CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience* 2: 737–738.
8. IPCC. 2007 *The Fourth Assessment Report Climate Change*. Pachauri, R. K. dan Reisinger, A. (eds). IPCC.
9. IPCC. 2003 *Good Practice Guidance for Land use, Land-use Change, and Forestry*. Penman, J. dkk. (eds). Institute for Global Environmental Strategies.
10. Keith, H., Mackey, B. G. dan Lindenmayer, D. B. 2009 Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. *Proceeding of the National Academy of Science USA* 106: 11635–11640.
11. Page, S. E. dkk. 2002 The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature* 420: 61–65.
12. Page, S. E., Rieley, J. O. dan Banks, C. J. 2011 Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology* 17: 798–818.
13. Murdiyarso, D. M., Hergoualc'h, K. dan Verchot, L. V. 2010 Opportunities for reducing greenhouse gas emissions in tropical peatlands. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 107, 19655–19660.
14. Gilman, E. L., Ellison, J., Duke, N. C. dan Field, C. 2009 Threats to mangroves from climate change and adaptation options. *Aquatic Botany* 89, 237–250.
15. Alongi, D. M. 2008 Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76: 113.
16. Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar, T. dan Marchand, C. 2008 Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems. *Aquatic Botany* 89: 201–219.
17. Komiya, A., Ong, J. E. dan Pongparn, S. 2008 Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests. *Aquatic Botany* 89: 128–137.
18. Twilley, R. R., Chen, R. H. & Hargis, T. 1992 Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems. *Water Air and Soil Pollution* 64: 265–288.
19. Bouillon, S. dkk. 2008 Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles* 22: GB2013.
20. Alongi, D. M. dkk. 2004 Sediment accumulation and organic material flux in a managed mangrove ecosystem: Estimates of land ocean atmosphere exchange in peninsular Malaysia. *Marine Geology* 208: 383–402.
21. Chmura, G. L., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R. dan Lynch, J. C. 2003 Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles* 17: 1111.
22. Eong, O. J. 1993 Mangroves carbon source and sink. *Chemosphere* 27: 1097–1107.
23. Golley, F., Odum, H. T. dan Wilson, R. F. 1962 The structure and metabolism of a Puerto Rican red mangrove forest in May. *Ecology* 43: 919.
24. Fujimoto, K. dkk. 1999 Belowground carbon storage of Micronesian mangrove forests. *Ecology Research* 14: 409–413.
25. Matsui, N. 1998 Estimated stocks of organic carbon in mangrove roots and sediments in Hinchinbrook Channel, Australia. *Mangrove and Salt Marshes* 2: 199–204.
26. Sjöling, S., Mohammed, S. M., Lyimo, T. J. dan Kyaruzi, J. J. 2005 Benthic bacterial diversity and nutrient processes in mangroves: Impact of deforestation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 63: 397–406.
27. Strangmann, A., Bashan, Y. dan Giani, L. 2008 Methane in pristine and impaired mangrove soils and its possible effects on establishment of mangrove seedlings. *Biology and Fertility of Soils* 44, 511–519.
28. Granek, E. dan Ruttenberg, B. I. 2008 Changes in biotic and abiotic processes following mangrove clearing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 80: 555–562.
29. Hooijer, A., Silvius, M., Wösten, H. dan Page, S. 2006 PEAT-CO₂: Assessment of CO₂ Emissions from Drained Peatlands in SE Asia. Delft Hydraulics Report Q3943.
30. Church, J. A. dkk. 2008 Understanding global sea levels: Past, present and future. *Sustainability Science* 3: 922.

Ucapan terima kasih

Kami berterimakasih kepada sejumlah mitra internasional kami dan staf lapangan untuk bantuan logistik dan pengumpulan data, yaitu: Otoritas Pengelolaan Sumber Daya Pulau Kosrae; Orangutan Foundation International; Direktorat Jenderal Perlindungan Hutan dan Konservasi Alam; Universitas Sam Ratulangi, Manado dan Institut Pertanian Bogor, Indonesia; Departemen Kehutanan, Bangladesh; dan KPSKSA (Cilacap, Indonesia). Kami juga berterimakasih kepada K. Gerow untuk bantuan statistik dan R. Mackenzie, C. Kryss dan J. Bonham untuk bantuannya dalam menghimpun data lokasi. Penyandang dana untuk penelitian ini adalah USDA Forest Service International Programs dan Australian Agency for International Development (AusAID).

Kontribusi penulis

D.C.D. bersama-sama merancang penelitian ini, mengumpulkan data lapang, melakukan analisis data dan memimpin penulisan makalah ini. J.B.K mengonsep dan bersama-sama merancang penelitian ini, dan berkontribusi dalam pengumpulan data dan penulisan. D.M. bersama-sama menyusun konsep penelitian ini, mengatur dan mengumpulkan data, serta menulis makalah ini. S.K. terlibat dalam pengumpulan data, analisis data dan penulisan. M.S. mengumpulkan data lapangan dan penulisan. M.K. bersama-sama menyusun konsep penelitian ini dan penulisan hasilnya.

Informasi tambahan

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat kepentingan keuangan yang saling bertentangan. Informasi tambahan yang melengkapi makalah ini dapat dibaca di www.nature.com/naturegeoscience. Informasi tentang perbanyakan dan perijinan tersedia online di <http://npg.nature.com/reprintsandpermissions>. Korespondensi dan permintaan terkait materi dapat ditujukan kepada D.C.D.

Suplemen informasi

Metode

Pengambilan contoh lapangan. Di 25 lokasi contoh yang tersebar di Indo-Pasifik (8° LS–22° LU, 90°–163° BT), kami membuat jalur di masing-masing lokasi pengambilan contoh yang dimulai dari dan tegak lurus pantai menuju daratan. Pengambilan contoh dilakukan tahun 2008–2009. Di setiap lokasi contoh kami melakukan stratifikasi berdasarkan sejumlah kisaran kondisi dan profil tegakan – mulai dari profil tegakan kecil dan tanah dangkal (ketinggian tajuk < 4 m atau rerata diameter pohon < 10 cm, kedalaman tanah < 0,5 m) sampai profil tegakan besar dan tanah dalam (ketinggian tajuk > 15 m atau rerata diameter pohon > 20 cm, tanah > 3 m) (Tabel Tambahan S1). Ciri-ciri struktural dari ketinggian pohon dan kedalaman tanah merupakan penentu utama bagi penyimpanan karbon, bahkan lebih dari faktor gradien lingkungan atau variasi geografis. Stratifikasi ini untuk memastikan bahwa berbagai tipe tegakan terwakili, selain rentang geografis dan bentuk lahan berupa muara *versus* laut (Tabel Tambahan S1, S2). Titik awal setiap jalur ditentukan secara acak sebelumnya dari penginderaan jauh, bergantung pada kendala akses dan kepemilikan lahan. Enam plot contoh berjarak 25 m ditetapkan di sepanjang masing-masing jalur, pusatnya diletakkan pada jarak 10, 35, 60, 85, 110 dan 135 m dari pantai; jarak jalur ini memungkinkan pengambilan contoh yang konsisten pada tegakan yang sempit maupun lebar. (Dengan catatan bahwa pengaturan plot di Sundarbans berbeda karena perlunya konsistensi dengan inventarisasi hutan setempat, dengan empat plot bagian luar yang terletak 50 m dari plot pusat ke arah mata angin utama, berpusat < 150 m dari sungai; lokasi-lokasi ini tidak diikutsertakan dalam analisis yang melibatkan jarak dari tepian. Mangrove muara (n=10) terletak pada delta aluvial yang luas dan sering memiliki laguna yang terlindung; mangrove laut (n=15) berada di lingkungan pantai, yang dikelilingi pulau-pulau dengan terumbu karang di pinggirannya. Hutan yang dijadikan contoh didominasi terutama oleh marga *Rhizophora*, *Bruguiera*, dan/atau *Sonneratia*, dan sejumlah kecil komponen *Xylocarpus* dan *Avicennia* (lokasi di Sundarbans didominasi oleh *Heritiera* dan *Excoecaria*) (Tabel Tambahan S1). Sasaran kami adalah semua simpanan C di atas tanah ditambah C di bawah tanah sampai dengan kedalaman maksimum 3 m; karena itu perkiraan simpanan C yang kami peroleh bersifat konservatif, terutama untuk kedalaman tanah organik yang melebihi 3 m.

Di setiap 6 plot contoh, kami mengukur semua pohon dengan diameter batang > 5 cm dalam areal beradius 7 m,

mencatat nama jenis, status hidup/mati, dan diameter batang pada ketinggian 1,4 m atau 30 cm di atas akar papan/tunjang (bergantung mana yang lebih tinggi).³¹ Anakan (diameter < 5 cm) yang berada dalam radius 2 m juga diukur. Kami mengukur volume kayu mati yang berada di atas lantai hutan dengan menggunakan metode *intersep planar*³² di empat sub jalur sepanjang 12 m yang diperoleh dari masing-masing plot pada sudut 45° dari jalur utama. Di hutan mangrove tumbuhan bawah diabaikan³³ dan tidak diambil sebagai contoh. Kami mengukur kedalaman tanah dengan memasukkan sebuah tongkat deteksi (*probe*) aluminium sampai mencapai lapisan dasar bawah permukaan (batu/karang) di tiga lokasi secara berurutan yang dekat dengan pusat masing-masing plot (panjang *probe* 3 m, batas yang dapat diterima dalam studi ini).

Kami melakukan mengambil contoh tanah dari pusat masing-masing plot dengan *peat auger* terbuka berdiameter 6,4 cm, yang mengurangi pemadatan tanah selama proses pengambilan contoh. Profil tanah kemudian dibagi secara sistematis ke dalam beberapa interval kedalaman, sesuai dengan rujukan tentang profil tanah mangrove di Indo-Pasifik yang telah dipublikasikan:³⁴ 0–15, 15–30, 30–50, dan 50–100 cm, ditambah kedalaman horizon dengan interval yang bervariasi bergantung pada kedalaman pasir karang/batu yang terletak di bawahnya. Subcontoh sebanyak 76,3 cm³ juga diambil dari masing-masing horizon yang kemudian langsung dikeringkan pada suhu 60 °C sampai massanya konstan.

Analisis Contoh dan Data. Kami menghitung biomassa di atas dan di bawah permukaan untuk masing-masing individu yang diukur dengan menggunakan persamaan alometrik dan berat jenis kayu yang telah dipublikasikan khusus untuk mangrove di wilayah tertentu.^{17,35,36} Volume kayu mati dikonversi menjadi massa dengan menggunakan berat jenis spesifik untuk wilayah, kelas ukuran, dan kelas kerusakan yang ditentukan melalui pengumpulan contoh pada saat penelitian ini.³² Nilai biomassa pohon dan kayu mati dikonversi menjadi massa C dengan menggunakan rasio konservatif C: biomassa yang diperoleh secara lokal yaitu 0,464 (rujukan 35). Untuk menentukan simpanan C, contoh tanah kering ditimbang untuk penentuan berat jenis, kemudian dihancurkan, dihomogenkan, disaring dengan saringan bermata saring 2 mm, dan konsentrasi C dianalisis menggunakan metode

pembakaran. Umumnya C anorganik (karbonat) pada sedimen mangrove²⁰ di Indo-Pasifik dapat diabaikan dan tidak dianalisis secara terpisah; namun perlakuan asam encer untuk menghilangkan karbonat tetap diterapkan untuk contoh dari lokasi-lokasi yang mengandung fragmen karang dan lain-lain.^{37,38} Kami juga mendapatkan bahwa perkiraan berat jenis tanah yang diperoleh dari pengeringan pada suhu 60 °C masih berada pada kisaran ~1% dari hasil yang diperoleh melalui pengeringan pada suhu 105 °C.

Berat jenis dan kandungan karbon kemudian dikombinasikan dengan pengukuran kedalaman tanah yang spesifik untuk masing-masing plot untuk memperoleh nilai C tanah dalam satu luasan. Simpanan C ekosistem dihitung sebagai jumlah dari semua komponen pohon, akar, kayu dan tanah; total simpangan baku diperoleh dengan menyebarkan simpangan baku ke semua komponen simpanan.³⁹

Kami menggunakan analisis data fungsional (FDA) untuk menganalisis perubahan kedalaman tanah dan simpanan C dengan perubahan jarak dari pantai. Dalam konteks studi ini, FDA melibatkan penghitungan laju perubahan menurut jarak dalam masing-masing lokasi menggunakan regresi linear, dilanjutkan dengan uji t-parametrik untuk menilai sejauh mana laju perubahan keseluruhan contoh berbeda dari 0. Uji-uji tersebut dilakukan secara terpisah untuk lokasi mangrove muara dan mangrove laut. Kami menganalisis variasi spasial kandungan dan berat jenis C tanah dengan menggunakan model regresi linear efek campuran, yaitu menilai pengaruh kedalaman, jarak contoh dari arah laut, dan bentuk lahan geomorfis (muara vs. laut). Model efek campuran secara fleksibel mencerminkan struktur *covariance* yang disebabkan oleh pengelompokan data (dalam kasus ini, plot dalam lokasi) dengan jalan menggabungkan efek acak dengan sejumlah observasi yang memiliki tingkat faktor klasifikasi yang sama.⁴⁰ Oleh karena itu analisis dilakukan pada tingkat plot dengan lokasi sebagai syarat acak untuk menghitung ketergantungan di dalam lokasi; parameter-parameternya diestimasi melalui kemiripan maksimum (*maximum likelihood*) terbatas. Persyaratan interaksi diikutsertakan dalam model, dan jika diperlukan data ditransformasi menggunakan \log_e untuk memenuhi asumsi variasi konstan dan normalitas.

Estimasi Global. Estimasi simpanan C global dan emisi oleh pemanfaatan lahan di hutan mangrove merupakan kegiatan yang sangat bermanfaat, namun mengalami banyak kesulitan karena keterbatasan data tentang simpanan C di bawah permukaan di sebagian besar wilayah sebarannya (misalnya: kombinasi data

kandungan C, berat jenis dan kedalaman), demikian juga pengaruh perubahan pemanfaatan lahan terhadap cadangan C. Data dari penelitian ini dapat digunakan sebagai masukan untuk melakukan estimasi simpanan C, walaupun perlu diingat bahwa penelitian ini bersifat umum, dan contoh-contoh yang diambil bukan mewakili semua mangrove secara global. Kami menindaklanjuti masalah ini dengan menggunakan dua pendekatan pelengkap: penyebaran ketidakpastian (*uncertainty propagation*) dan penyesuaian (*adjustments*) berdasarkan kelompok data global yang lain.

Untuk penyebaran ketidakpastian, kami terlebih dulu melakukan pemekaran (*scale up*) untuk memperoleh nilai simpanan C global dengan menggunakan data dari batas ekstrem bawah, (persentil ke-5) dari distribusi kami – misalnya, biomassa rendah, tanah dangkal; karenanya simpanan C rendah – dan dengan demikian mengasumsikan bahwa mangrove di seluruh dunia, secara umum berada pada ujung profil tegakan kecil dari rentang yang kami amati. Kami mengulangi penghitungan dengan menggunakan data dari batas ekstrem atas (persentil ke-95) dari distribusi kami – misalnya, biomassa tinggi, tanah dalam; karenanya memiliki simpanan C tinggi – dan dengan demikian mengasumsikan bahwa mangrove di seluruh dunia, secara umum berada pada ujung profil tegakan besar dari rentang pengamatan kami. Persentil ke-5 dan ke-95 digunakan untuk menghindari pengaruh pencilan (*outliers*) di kedua arah. Secara individu, kedua ekstrem tersebut kemungkinan tidak terjadi, namun secara bersama-sama bisa jadi merupakan nilai simpanan C global per-hektar, meskipun jika contoh yang kami ambil berbeda dari populasi mangrove global. Kami menyebarkan ketidakpastian ini dengan menggabungkan estimasi batas bawah dengan estimasi rendah wilayah mangrove global yang telah dipublikasikan (13,8 juta ha),⁶ selanjutnya mengombinasikan estimasi batas atas dengan estimasi tinggi wilayah mangrove global yang telah dipublikasikan (15,2 juta ha).⁴ Akhirnya, kami menerapkan faktor penyesuaian terhadap kandungan C tanah kami berdasarkan kumpulan data global yang paling komprehensif tentang kandungan C tanah. Data tersebut memiliki nilai tengah kandungan C sebesar 2,2% pada mangrove, yang jika dikombinasikan dengan hubungan berbalik yang terkenal antara kandungan C dan berat jenis (misalnya, dengan menggunakan data dari penelitian ini dihasilkan hubungan kuantitatif $[\%OC = 3,0443 \cdot BD^{-1,313}]$, $R^2 = 0,62$, Gambar Tambahan S1) diperoleh nilai kandungan C tanah sebesar $\sim 0,028 \text{ g C cm}^{-3}$. Nilai ini lebih rendah dibandingkan observasi kami untuk wilayah Indo-Pasifik ($0,043 \text{ g C cm}^{-3}$ jika diambil rerata berdasarkan wilayah). Karena itu, dalam menghitung rentang ketidakpastian yang disebutkan di atas, kami mengalikan nilai C tanah

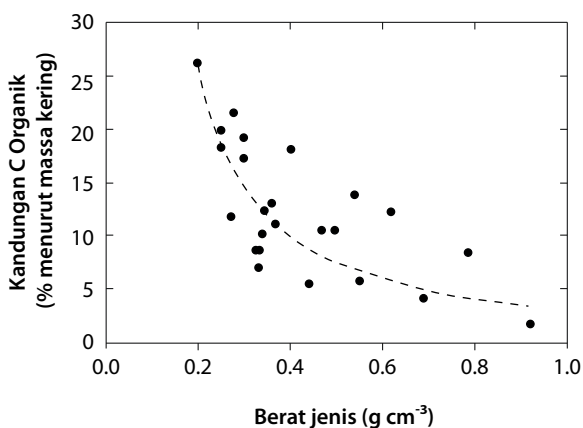
kami dengan sebuah faktor penyesuaian yaitu (1–0,35) agar diperoleh estimasi yang lebih konservatif untuk simpanan C global. (Nilai akhir untuk peningkatan global: persentil ke-5: 32,6 Mg C ha⁻¹ untuk biomassa dan 256 Mg C ha⁻¹ untuk tanah, akhir persentil ke- 95: 501 Mg C ha⁻¹ untuk biomassa dan 813 Mg C ha⁻¹ untuk tanah). Perlu dicatat bahwa penyesuaian ini hanya diterapkan ketika melakukan penghitungan di tingkat global, dan bukan pada hasil-hasil regional yang disajikan pada Gambar 2–4, yang memiliki penjelasan langsung terhadap wilayah Indo-Pasifik.

Estimasi emisi global dari perubahan pemanfaatan lahan dilakukan dengan menggunakan pendekatan penyebaran ketidakpastian yang sama, yaitu menerapkan serangkaian asumsi yang sederhana namun logis tentang kondisi berbagai simpanan C dengan adanya konversi mangrove. Kami sekali lagi menggabungkan estimasi cadangan C kami dengan estimasi dari kompilasi global,^{16,17} kemudian, untuk estimasi dampak konversi batas bawah, diterapkan kehilangan biomassa sebesar 50%, kehilangan C tanah sebesar 25% dari 30 cm bagian paling atas, dan tidak terdapat kehilangan dari lapisan-lapisan yang lebih dalam. Untuk estimasi batas atas dari dampak konversi, kami menerapkan kehilangan biomassa sebesar 100%, kehilangan C tanah sebesar 75% dari 30 cm bagian atas tanah, dan kehilangan sebesar 35% dari lapisan-lapisan yang lebih dalam. Kemungkinan batas bawah dapat berlaku

untuk pemanfaatan lahan yang merusak mangrove seperti penebangan yang berlebihan dan/atau gangguan tanah sedang, adapun batas atas bisa berlaku untuk sejumlah kegiatan yang lebih berat, seperti pembuatan tambak udang yang melibatkan pembukaan hutan total dan penggalian/penimbunan 50–100+ cm tanah pada bagian atas. Untuk itu diperoleh estimasi yang masuk akal di mana sebesar 112–392 Mg C dilepaskan per hektar lahan yang terkena dampak. Selanjutnya kami menggabungkan rentang ini dengan rentang wilayah mangrove (13,8–15,2 juta ha)^{4,6} dan laju deforestasi (1–2% th⁻¹)^{1,4} yang telah dipublikasikan, menyebarkan estimasi batas bawah untuk memperoleh ekstrem rendah dan estimasi batas atas untuk memperoleh ekstrem tinggi. Kami menggunakan sebuah rentang nilai wilayah mangrove karena sumber yang terbaru kemungkinan merupakan estimasi konservatif dari wilayah keseluruhan,⁶ dan karena laju emisi terbaru diperoleh tidak hanya dari wilayah saat ini namun berasal dari wilayah yang terkena dampak deforestasi pada beberapa dekade terakhir – yang yang luas wilayahnya lebih besar.⁴

Referensi

31. Komiyama, A., Pongparn, S. dan Kato, S. 2005 Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *J. Trop. Ecol.* 21, 471–477.
32. Harmon, M.E. dan Sexton, J. 1996 Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems. Publication 21, United States Long Term Ecological Research Network Office, Seattle.
33. Snedaker, S.C. dan Lahmann, E.J. 1988. Mangrove understorey absence: a consequence of evolution. *J. Trop. Biol.* 4, 311–314.
34. United States Department of Agriculture (USDA) 1983. Soil survey of island of Kosrae, Federated States of Micronesia. Soil Conservation Service, Hawaii.
35. Kauffman, J.B. dan Cole, T.G. 2010. Micronesian mangrove forest structure and tree responses to a severe typhoon. *Wetlands* 30, 1077–1084.
36. Cole, T.G., Ewel, K.C. dan Devoe, N.N. 1999. Structure of mangrove trees and forests in Micronesia. *For. Ecol. Manage.* 117, 95–109.
37. Schumacher, B. 2002 Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments. NCEA-C- 1282, EMASC-001, United States Environmental Protection Agency, Las Vegas.
38. Harris, D., Horwath, W.R. dan van Kessel, C. 2001. Acid fumigation of soils to remove carbonates prior to total organic carbon or carbon-13 isotopic analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 1853–1856.
39. Pearson, T., Walker, S. dan Brown, S. 2005. Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects. BioCF and Winrock International report. www.winrock.org/ecosystems/tools.asp?BU=9086.
40. Insightful Corporation 2001 S-Plus user's guide, www.insightful.com



Gambar Tambahan S1. Hubungan antara kandungan karbon organik dengan berat jenis tanah mangrove dari 25 tegakan contoh sepanjang wilayah Indo-Pasifik

Tabel Tambahan S1. Ciri-ciri umum hutan mangrove yang diambil sebagai contoh, diuraikan berdasarkan kelas profil tegakan^a

Profil tegakan kecil (n=9)						Profil tegakan sedang (n=5)						Profil tegakan besar (n=11)					
Lokasi ^b	Bentuk geomorfis ^c	Garis Lintang, Bujur (derajat)	Ukuran Hutan (ha)	Rentang pasang surut (m) ^d	Tipe penutupan ^e	Ukuran ^b	Bentuk geomorfis ^c	Garis Lintang, Bujur (derajat)	Ukuran Hutan (ha)	Rentang pasang surut (m) ^d	Tipe penutupan ^e	Ukuran ^b	Bentuk geomorfis ^c	Garis Lintang, Bujur (derajat)	Ukuran Hutan (ha)	Rentang pasang surut (m) ^d	Tipe penutupan ^e
Y1	Laut	9,55631 N 138,17981 E	10	1,5	S/R	Y2	Laut	9,51450 N 138,14933 E	70	1,5	S/R	K1	Laut	5,34919 N 162,96306 E	60	1,7	S
G1	Muara	22,25585 N 89,62956 E	106	-	H/E	S5	Laut	1,29617 N 124,50681 E	80	2,5	S/R	K2	Laut	5,28219 N 162,96406 E	70	1,7	S/B
J1	Muara	7,71289 S 108,95828 E	500	1,2	S/R	S6	Muara	1,37225 N 124,55069 E	120	2,5	R	K3	Laut	5,32633 N 162,94497 E	90	1,7	S/B
J2	Muara	7,72369 S 108,97044 E	2 700	1,2	S/R	G2	Muara	22,31942 N 89,62878 E	106	-	H/E	K4	Laut	5,28328 N 162,91050 E	25	1,7	S/R
S1	Laut	1,74986 N 124,73622 E	220	2,5	R	B1	Muara	2,73667 S 111,73775 E	500	3,0	R?B	Y3	Laut	9,55278 N 138,09983 E	15	1,5	S/B
S2	Laut	1,69453 N 124,95869 E	70	2,5	R/X							Y4	Laut	9,54253 N 138,09072 E	15	1,5	S/B
S3	Laut	1,73781 N 124,75486 E	150	2,5	R							Y5	Laut	9,58842 N 138,12747 E	20	1,5	S/B
S4	Laut	1,56733 N 124,80381 E	35	2,5	S/R							B2	Muara	2,84886 S 111,73872 E	125	3,0	B/R
P1	Laut	7,35211 N 134,53911 E	40	1,9	R							B3	Muara	2,78389 S 111,69878 E	150	3,0	R
												B4	Muara	2,85594 S 111,73181 E	65	3,0	B/R
												B5	Muara	2,74128 S 111,71383 E	175	3,0	R

- a Kelas profil tegakan dikelompokkan sebagai: Kecil, rerata diameter pohon < 10 cm atau tinggi tajuk < 4 m;Sedang, rerata diameter pohon 10–20 cm dan tinggi tajuk 4–15 m; Besar, rerata diameter pohon > 20 cm atau tinggi tajuk > 15,
- b Lokasi: B. Borneo; G. Delta Gangga-Brahmaputra (Sundarbans, Banglades); J. Jawa: K. Kosrae; P. Palau; S. Sulawesi; Y. Yap
- c Bentuk geomorfis: Muara, lokasi di muara/delta sungai; Laut, lokasi di lautan/tepi pulau.
- d Rentang pasang surut adalah nilai skala daerah yang ditentukan dari tingkat maksimum dan minimum pasang surut selama 2010. Untuk lokasi Delta Gangga-Brahmaputra nilai ini tidak dicantumkan karena adanya dominasi kejadian banjir sungai musiman (pengaruh angin musim) dan bukan suatu rentang pasang surut yang dikuantifikasi dengan baik.
- e Tipe penutupan didefinisikan oleh dominasi marga pohon berdasarkan luas bidang dasar (BA). B. *Bruguiera*; E. *Excoecaria*; H. *Hertiera*; R. *Rhizophora*; S. *Sonneratia*; X. *Xylocarpus*

Tabel Tambahan S2. Data cadangan karbon untuk setiap tegakan contoh

Lokasi ^a	Bentuk lahan	Total C ekosistem	Total C di atas permukaan	Total C di bawah permukaan	C pohon (batang, cabang, dedaunan)	C pohon (akar)	C kayu mati	C tanah	Kedalaman tanah (cm)	Berat jenis (g cm ⁻³)	% OC tanah
G1	Muara	547,0	107,4	439,6	103,3	53,6	4,2	386,0	300	0,920	1,69
G2	Muara	584,1	60,0	524,1	56,1	32,3	3,9	491,8	300	0,920	1,74
J1	Muara	437,0	6,5	430,5	2,3	0,5	4,2	430,0	142	0,551	5,71
J2	Muara	736,4	17,1	719,4	12,7	6,2	4,3	713,2	281	0,440	5,54
B1	Muara	1044,2	78,3	965,9	67,1	22,4	11,2	943,5	300	0,326	8,63
B2	Muara	1472,0	181,7	1290,3	145,1	55,8	36,7	1234,5	300	0,336	8,65
B3	Muara	1307,5	196,6	1110,9	178,7	61,9	17,9	1049,0	300	0,339	10,1
B4	Muara	1391,7	103,9	1287,8	84,8	32,8	19,0	1255,0	300	0,271	11,8
B5	Muara	1016,2	154,8	861,5	145,8	47,6	9,0	813,9	300	0,330	7,09
S6	Muara	2202,9	111,0	2091,8	89,1	28,2	21,9	2063,6	300	0,401	18,1
S1	Laut	734,0	145,8	588,2	93,2	27,5	52,6	560,7	81	0,785	8,42
S2	Laut	415,1	115,0	300,0	29,8	9,8	85,3	290,2	48	0,277	21,5
S3	Laut	774,6	68,0	706,6	44,0	10,5	24,0	696,0	122	0,300	19,3
S4	Laut	859,3	87,4	772,0	55,4	31,5	32,0	740,4	103	0,541	14,0
S5	Laut	716,0	97,7	618,2	56,7	36,9	41,1	581,3	80	0,616	12,2
P1	Laut	706,5	118,1	588,4	104,4	67,8	13,8	520,6	117	0,250	18,4
Y1	Laut	823,2	140,0	683,2	132,2	80,4	7,8	602,8	144	0,342	12,2
Y2	Laut	895,8	205,3	690,5	186,7	107,8	18,6	582,7	124	0,251	20,0
Y3	Laut	1345,7	280,5	1065,2	268,2	190,3	12,3	874,9	174	0,298	17,2
Y4	Laut	1046,4	246,5	799,9	238,5	168,3	8,0	631,6	144	0,371	11,2
Y5	Laut	1775,4	434,8	1340,7	418,5	263,1	16,3	1077,6	223	0,496	10,5
K1	Laut	870,6	247,2	623,4	237,9	195,9	14,0	427,5	74	0,359	13,0
K2	Laut	1676,0	250,1	1425,9	242,5	203,7	7,6	1222,3	275	0,472	10,6
K3	Laut	1172,4	303,1	869,3	248,1	194,0	55,1	675,3	299	0,690	4,23
K4	Laut	1032,8	223,8	809,0	193,0	86,7	30,8	722,3	155	0,196	26,2
Rerata muara		1073,9	101,7	972,2	88,5	34,1	13,2	938,1	282,3	0,483	7,9
Rerata laut		989,6	197,6	792,0	169,9	111,6	28,0	680,4	144,2	0,416	14,6
Rerata keseluruhan		1023,3	159,2	864,1	137,4	80,6	22,1	783,5	199,4	0,443	11,9

Semua data menggunakan satuan Mg C ha⁻¹ kecuali jika sudah diberikan keterangan lain

a Lokasi: B. Borneo; G. Delta Gangga-Brahmaputra (Sundarbans, Bangladesh); J. Jawa: K. Kosrae; P. Palau; S. Sulawesi; Y. Yap

Edisi ini diterjemahkan dari 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*. Published online: 3 April 2011. DOI: 10.1038/NGEO1123. Kami berterimakasih kepada *Nature Geoscience* yang memberikan izin untuk menerbitkan dalam bahasa Indonesia



Australian Government
AusAID

www.cifor.org

www.ForestsClimateChange.org



Center for International Forestry Research

CIFOR memajukan kesejahteraan manusia, konservasi lingkungan dan kesetaraan melalui penelitian yang berorientasi pada kebijakan dan praktek kehutanan di negara berkembang. CIFOR merupakan salah satu dari 15 pusat penelitian dalam Kelompok Konsultatif bagi Penelitian Pertanian Internasional (Consultative Group on International Agricultural Research – CGIAR). CIFOR berkantor pusat di Bogor, Indonesia dengan kantor wilayah di Asia, Afrika dan Amerika Selatan.

