

MANGROVE DAN PERUBAHAN IKLIM: PANDUAN STASIUN MONITORING MANGROVE

Mengungkap peran ekosistem mangrove
dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim

Frida Sidik, Nuryani Widagti dan Hanggar Prasetyo Kadarisman

MANGROVE DAN PERUBAHAN IKLIM: PANDUAN STASIUN MONITORING MANGROVE

Mengungkap peran ekosistem mangrove dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim

Frida Sidik
Nuryani Widagti
Balai Riset dan Observasi Laut

Hanggar Prasetio Kadarisman
Conservation International Indonesia

Hak Cipta © 2019 Balai Riset dan Observasi Laut, BRSDM-KKP

Sitasi: Frida Sidik, Nuryani Widagti dan Hanggar Prasetio Kadarisman. 2019. Mangrove dan Perubahan Iklim: Panduan Stasiun Monitoring Mangrove. Mengungkap peran ekosistem mangrove dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Balai Riset dan Observasi Laut. Bali

Buku ini diterbitkan atas dukungan dari *Partnerships for Enhanced Engagement in Research* (PEER) - U.S. Government (USG) melalui *Program Supported Partner Evidence to Action Supplements of Enhancement of Research for Adaptation of Wetlands in Indonesia to Projected Impacts of Sea Level Rise* (AID-OAA-A-11-00012)

Kata Sambutan



“Limiting global warming to 1.5 °C” merupakan kata kunci tantangan dunia dalam mengendalikan perubahan iklim. Dari sektor kelautan, salah satu dampak perubahan iklim yang memberikan pengaruh terhadap kelestarian sumberdaya pesisir dan laut adalah kenaikan muka air laut (*sea level rise*, SLR). SLR dapat menyebabkan meluasnya daerah penggenangan air laut di wilayah pesisir yang berdampak pada kehidupan masyarakat dan ekosistem pesisir, termasuk mangrove. Di lain pihak, ekosistem pesisir telah dikenal sebagai ekosistem karbon biru yang memiliki kemampuan untuk menyerap dan menyimpan CO₂ dari atmosfer. Hutan mangrove secara efektif menjadi kantong karbon biru dan sekaligus sebagai sabuk hijau yang mampu memberikan perlindungan bagi masyarakat pesisir dari badai dan cuaca laut ekstrem lainnya.

Badan Riset dan Sumberdaya Manusia Kelautan dan Perikanan – Kementerian Kelautan dan Perikanan sebagai institusi yang melaksanakan dan mengembangkan kegiatan riset dalam menangani permasalahan di bidang kelautan dan perikanan, menyambut baik kegiatan riset yang dapat menghasilkan dukungan ilmiah bagi pemangku kebijakan maupun masyarakat luas. Semoga buku ini dapat menjadi acuan rekomendasi dalam menjawab isu adaptasi perubahan iklim dan berkontribusi pada pembangunan masyarakat dan lingkungan hidup.

Jakarta, Juli 2019

Kepala Badan Riset dan Sumber Daya Manusia Kelautan dan Perikanan

Prof. Ir. R. Sjarief Widjaja, Ph.D., FRINA

Kata Sambutan



Menyadari peran ekosistem mangrove dalam upaya adaptasi dan mitigasi perubahan iklim sekaligus potensi dampak perubahan iklim terhadap ekosistem mangrove, Balai Riset dan Observasi Laut (BROL) menyelenggarakan kegiatan riset *Enhancement of Research for Adaptation of Wetlands in Indonesia to Projected Impacts of Sea Level Rise* dalam kerangka program hibah bersaing *Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER) - U.S. Government (USG)*. Kegiatan riset ini dilaksanakan selama dua tahun (2013-2014) dengan dukungan pendanaan dari *United State Agency for International Development (USAID)*. Keberhasilan riset multi tahun ini mendapat sambutan baik dari pihak PEER dan dilanjutkan dengan kegiatan diseminasi pada tahun 2015 dan 2018-2019. Melalui kegiatan diseminasi yang dikemas dalam Program *Supported Partner Evidence to Action Supplements – PEER*, hasil riset ini diharapkan dapat berdampak kepada masyarakat yang lebih luas. Selama kegiatan berlangsung, BROL bekerjasama dengan mitra dari pemerintah daerah, akademisi dan LSM.

Salah satu kegiatan perluasan manfaat kegiatan riset BROL adalah penerbitan buku **Mangrove dan Perubahan Iklim: Panduan Stasiun Monitoring Mangrove**, yang dapat digunakan oleh kalangan akademisi maupun praktisi di bidang sumberdaya pesisir. Dengan panduan ini, para pengguna dapat memvalidasi informasi dan isu-isu strategis di bidang pengelolaan mangrove dan perubahan iklim. Kami berharap buku ini menjadi produk riset Balai Riset dan Observasi Laut yang bermanfaat untuk masyarakat dan lingkungan hidup, melalui peningkatan kemampuan para peneliti Indonesia dalam melakukan monitoring ekosistem pesisir, khususnya terkait dengan isu perubahan iklim.

Jembrana, Juli 2019

Kepala Balai Riset dan Observasi Laut

Dr. I Nyoman Radiarta, M. Sc

Kata Pengantar

Dalam rangka membangun pemahaman yang lebih baik terhadap dampak perubahan iklim terhadap ekosistem pesisir di Indonesia, peneliti BROL melaksanakan riset **Adaptasi Lahan Basah di Indonesia terhadap Dampak Kenaikan Muka Laut** (*Enhancement of Research for Adaptation of Wetlands in Indonesia to Projected Impacts of Sea Level Rise*) untuk mengkaji adaptasi ekosistem mangrove terhadap SLR. Kegiatan ini dilaksanakan multi-tahun sejak tahun 2011 untuk mendapatkan tren jangka panjang sebagai prasyarat untuk kajian terkait perubahan iklim. Hasil kegiatan ini berkontribusi pada pengembangan metode prediksi adaptasi mangrove terhadap kenaikan muka laut sekaligus pendugaan penyerapan karbon biru di hutan mangrove. Dengan digunakannya metode ini, fungsi mangrove dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim dapat terungkap.

Pemantauan telah dilakukan di stasiun monitoring di empat lokasi studi yang mempresentasikan hutan mangrove berdasarkan geomorfologi dan kondisi lingkungan, yaitu tipe *riverine mangroves* di hutan restorasi Perancak (Bali), tipe *riverine mangroves* di hutan terdegradasi Dumai (Riau), tipe *delta mangroves* di hutan terdegradasi Porong (Jawa Timur) dan tipe *fringe mangroves* di hutan konservasi Nusa Lembongan (Bali). Dalam buku ini penulis memperkenalkan cara membangun stasiun monitoring dan metode monitoring mangrove beserta penjelasan ilmiah. Metode tersebut merupakan adopsi dari kajian mangrove yang telah ada dan telah tervalidasi secara ilmiah. Penulis menyadari bahwa metode ini masih perlu disempurnakan dan dikembangkan untuk tipe mangrove lainnya dan kondisi lingkungan yang berbeda.

Jembrana, Juli 2019

Penulis

Daftar Isi

Kata Sambutan	1
Kata Pengantar	3
Daftar Isi	4
Bab 1. Pendahuluan	5
Latar belakang	5
Sistematika penyajian buku	5
Persantunan	6
Bab 2. Fungsi mangrove dalam pengendalian perubahan iklim	7
Bab 3. Mangrove dan Sea Level Rise: Adaptasi mangrove terhadap kenaikan muka laut	9
Respon ekosistem mangrove terhadap sea level rise	9
Pengukuran dinamika geomorfologi hutan mangrove	11
Bab 4. Karbon Biru: Mangrove sebagai ekosistem pesisir penyerap dan penyimpan karbon	13
Estimasi penyerapan karbon	14
Menghitung stok karbon	15
Daftar Pustaka	16
SOP 1: Pemilihan lokasi stasiun	18
SOP 2: Instalasi RSET - MH	20
SOP 3: Pemantauan produktivitas mangrove	25
SOP 4: Identifikasi karakteristik ekosistem	27
SOP 5: Pengukuran elevasi tanah dengan RSET	32
SOP 6: Pengukuran akresi vertikal	35
SOP 7: Menghitung stok karbon	36

Bab 1. Pendahuluan

Latar belakang

Mangrove merupakan ekosistem kunci yang menyediakan berbagai kebutuhan penting untuk keberlangsungan hidup masyarakat pesisir, termasuk fungsi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Fungsi adaptasi mangrove ditunjukkan dengan respon alami terhadap dampak perubahan iklim yang dapat memberikan kontribusi positif terhadap resiliensi pesisir (*coastal resilience*). Salah satunya adalah respon terhadap kenaikan muka air laut atau *sea level rise* (SLR) melalui proses kenaikan elevasi permukaan tanah agar dapat mengimbangi laju SLR^{1,2}. Proses tersebut juga menjadi indikator besarnya penyerapan karbon biru (*blue carbon*) di dalam tanah hutan mangrove³. Tanah merupakan kantong karbon (*carbon pool*) yang menyimpan kandungan karbon biru terbesar, mencapai lebih dari 80% dari total karbon biru yang tersimpan di dalam ekosistem mangrove⁴.

Dual fungsi mangrove dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim dapat dikaji dengan menggunakan metode yang telah diadaptasi secara luas oleh para peneliti lahan basah (*wetland*) dunia. Lebih lanjut, metode ini dapat dikembangkan dan dipadukan dengan metode kajian ekologi mangrove yang umum digunakan. Buku **Mangrove dan Perubahan Iklim: Panduan Stasiun Monitoring Mangrove** memperkenalkan metode yang digunakan oleh peneliti BROL dalam monitoring mangrove di plot permanen sekaligus memberikan penjelasan keterkaitan metode tersebut dengan pemahaman peran mangrove dalam pengendalian perubahan iklim.

Sistematika penyajian buku

Buku ini disusun untuk menjelaskan fungsi mangrove dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim serta metode untuk mengestimasi kapasitas fungsi tersebut. Justifikasi ilmiah terkait dengan metode penghitungan dijelaskan pada Bab 2 (penjelasan fungsi umum mangrove), Bab 3 (fungsi adaptasi) dan 4 (fungsi mitigasi). Metode dijabarkan secara sistematis dalam bagian lampiran *Standard Operating Procedures* (SOP).

SOP 1 merupakan langkah awal untuk memulai pembangunan stasiun yang akan digunakan untuk riset atau kegiatan terkait dengan monitoring mangrove.

Instalasi seluruh alat monitoring sebaiknya dilaksanakan bersamaan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih baik. Petunjuk instalasi instrumen terdapat pada SOP 2, SOP 3 dan SOP 4 berupa *rod surface elevation table – marker horizon* (RSET-MH) dan instrumentasi pendukung yang digunakan untuk pengambilan data geomorfologi dan produktivitas mangrove. SOP 3 dapat diintegrasikan dengan SOP 7, terutama dalam penentuan pohon yang akan dipantau dalam jangka panjang. SOP 5 dan 6 merupakan petunjuk teknis pengukuran RSET-MH yang dilakukan jangka panjang.

Persantunan

Buku ini disusun sebagai deskripsi kegiatan monitoring mangrove yang diadopsi dan dikembangkan dari sumber utama, yaitu:

1. *The surface elevation table and marker horizon technique: A protocol for monitoring wetland elevation dynamics*. Penulis: James C. Lynch, Philippe Hensel dan Donald R. Cahoon.
2. *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. Editor: Jennifer Howard, Kirsten Isensee, Emily Pidgeon, dan Maciej Telszewski.
3. *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*. Penulis: J. Boone Kauffman dan Daniel C. Donato.

Bab 2. Fungsi mangrove dalam pengendalian perubahan iklim

Mangrove merupakan ekosistem pesisir yang terdapat di wilayah pasang surut dan tersebar di pesisir beriklim tropis dan subtropis (30°LS-LU). Menurut Giri et al., (2011), mangrove mencakup 0,7% (~13.4 juta ha) dari total hutan dunia, yang terdapat di 118 negara dan teritori. Indonesia merupakan negara dengan luas mangrove terbesar, yaitu 3,1 juta ha atau 22,6% dari mangrove dunia⁵. Mangrove Indonesia terletak di kawasan 'hot spot' mangrove dunia dimana terdapat setidaknya 243 jenis mangrove, termasuk 48 jenis mangrove sejati⁶.

Tabel 1. Jasa ekosistem mangrove yang memberikan manfaat bagi masyarakat.

Jasa	Fungsi	Nilai ekonomi
Produk kehutanan	Keragaman hayati yang menjadi hasil hutan kayu dan non kayu	*US\$ 484 – 585 ha ⁻¹ thn ⁻¹ , +US\$ 285 174 ha ⁻¹ thn ⁻¹
Pelindung pantai	Mencegah erosi dan stabilisasi sedimen	*US\$ 3679 ha ⁻¹ thn ⁻¹
	Melindungi badai melalui penyerapan energi gelombang dan angin	*US\$ 8966 – 10821 ha ⁻¹
Sumberdaya perikanan	Sebagai habitat biota	*US\$ 484 – 585 ha ⁻¹ thn ⁻¹ , !US\$ 117 ha ⁻¹ thn ⁻¹
Siklus karbon	Fungsi penyerapan dan penyimpanan karbon dalam biomassa pohon dan tanah	*US\$ 30.50 ha ⁻¹ thn ⁻¹
Ekowisata	Pendapat ekonomi masyarakat dari pengelolaan wisata	^US\$ 30.50 thn ⁻¹
Filter air	Pemanfaatan mangrove dalam <i>water treatment</i>	+US\$ 14 631 – 24 589 ha ⁻¹ thn ⁻¹

Sumber: Barbier et al. (2011)*, Ruitenbeek, (1992)[!], Ambarita et al. (2018)^ dan Cabrera et al (1998)⁺.⁷⁻¹⁰

Mangrove memberikan manfaat bagi kehidupan manusia karena memiliki berbagai fungsi, seperti sumberdaya perikanan, sumber ekonomi masyarakat, pelindung lingkungan dari pencemaran, hingga pengendali

bencana termasuk dampak perubahan iklim (Tabel 1). Fungsi mangrove dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim terkait dengan struktur mangrove yang unik untuk dapat beradaptasi terhadap lingkungan pesisir. Mangrove memiliki akar yang berperan penting mempertahankan pertumbuhan mangrove dan kestabilan lingkungan terhadap dinamika pesisir dan laut. Dengan struktur akar yang berbentuk akar nafas, mangrove secara aktif mengikat sedimen, meningkatkan ketebalan tanah mangrove dan memperluas wilayah tumbuh mangrove, sekaligus menyediakan fungsi untuk proteksi pantai¹¹. Proses ini merupakan gambaran fungsi adaptasi mangrove terhadap lingkungan dan perubahan iklim¹². Selain itu, pengikatan sedimen dalam hutan mangrove merupakan bagian proses penyimpanan karbon dalam mangrove, yang disebut karbon biru (*blue carbon*), yang mempresentasikan fungsi mangrove dalam mitigasi perubahan iklim.

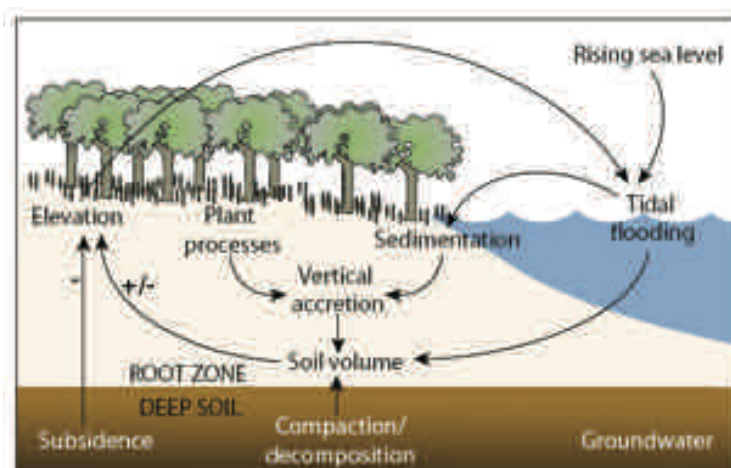


Gambar 1. Struktur akar napas *Sonneratia* dan *Rhizophora*.

Bab 3. Mangrove dan *Sea Level Rise*: Adaptasi mangrove terhadap kenaikan muka laut

Adaptasi mangrove terhadap SLR ditandai oleh kemampuan mangrove untuk tumbuh dan bermigrasi ke arah darat dan/atau kenaikan elevasi permukaan tanah¹³. Secara alami, mangrove dapat beradaptasi terhadap kenaikan muka air laut jika laju kenaikan elevasi permukaan tanah dapat melebihi atau tidak lebih kecil dibandingkan dengan laju SLR¹. Proses-proses yang mempengaruhi kemampuan mangrove tersebut perlu dikaji, sehingga dapat diketahui tingkat adaptasi mangrove terhadap kenaikan muka laut dan dampaknya pun dapat diprediksi lebih dini.

Respon ekosistem mangrove terhadap sea level rise



Gambar 2. Respon mangrove terhadap SLR (sumber: Lovelock & Ellison 2007).

Sebagai ekosistem pesisir, mangroves tumbuh mengikuti evolusi geomorfologi pantai sesuai dengan kondisi pasang surut dan perubahan permukaan air laut (*sea level*)¹⁵. Apabila terjadi SLR, mangrove dapat beradaptasi dengan proses yang kompleks dan saling terkait antara satu faktor dengan faktor lainnya (Gambar 2). Ketika pasang surut masuk ke dalam hutan mangrove, sedimen yang terbawa air laut terperangkap oleh akar sehingga terjadi peningkatan input sedimen (*sedimentation*) dan akresi

tanah (*vertical accretion*). Selain sedimen, akresi tanah dapat bersumber dari vegetasi mangrove, seperti serasah dan akar, dan biota yang hidup di sekitar mangrove, yaitu mikroba dan alga. Akresi tanah berkontribusi pada penambahan volume tanah (*soil volume*) yang kemudian memberi dampak kenaikan atau penurunan elevasi permukaan tanah (*elevation*). Perubahan volume tanah juga dapat disebabkan oleh input air laut yang masuk ke dalam tanah, pemadatan tanah (*compaction*) dan proses dekomposisi (*decomposition*). Bila terjadi subsidensi tanah (*subsidence*), maka elevasi permukaan tanah akan turun.

Kemampuan mangrove untuk beradaptasi bersifat *site specific* karena dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain tipe dan produktivitas mangrove, kondisi geomorfologi, pasang surut dan input sediment yang masuk ke hutan mangrove^{13,14}. Perbedaan proses pembentukan tanah di setiap tipe geomorfologi memberikan kontribusi terhadap perbedaan laju perubahan elevasi permukaan tanah dan akresi vertikal¹⁶. Mangrove yang hidup di daerah yang memiliki pasang surut besar (*macrotidal*) dapat beradaptasi lebih baik dari pada mangrove yang hidup di daerah yang memiliki pasang surut kecil (*microtidal*)¹⁴. Indonesia memiliki kondisi geomorfologi pesisir (Gambar 3) dan pola pasang surut yang beragam sehingga kemampuan adaptasi mangrove di setiap wilayah akan berbeda.



Gambar 3. Tipologi hutan mangrove di Indonesia berdasarkan geomorfologi pesisir (<https://maps.oceanwealth.org/mangrove-restoration/>).

Pengukuran dinamika geomorfologi hutan mangrove

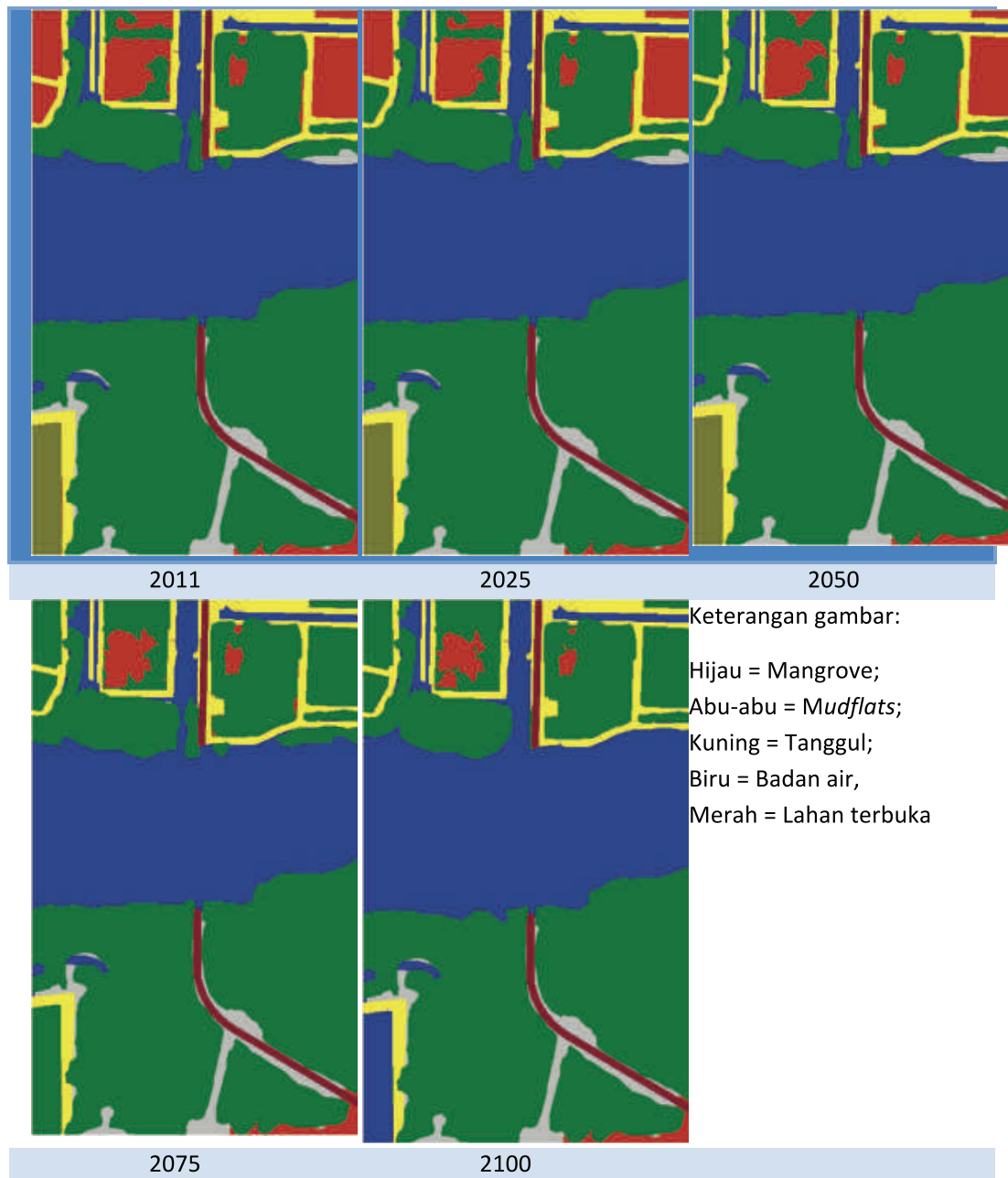
Prinsip metode pemantauan adaptasi mangrove terhadap SLR adalah untuk mengetahui laju perubahan elevasi permukaan tanah (*soil surface elevation change*) hutan mangrove. Selain memantau elevasi permukaan tanah, proses geomorfologi lainnya yang dipantau adalah akresi vertikal (*vertical accretion*). Akresi vertikal adalah perubahan dimensi vertikal sedimen di lapis permukaan tanah yang disebabkan oleh proses deposisi sedimen atau erosi dan proses biologi (serasah, pertumbuhan akar atau formasi lapisan alga)^{16,17}. Hasil perhitungan perubahan elevasi permukaan tanah dan akresi vertikal dapat diketahui *shallow subsidence*, dengan persamaan dari Cahoon et al (1995)¹⁸:

$$\text{Shallow subsidence} = \text{vertical accretion} - \text{surface elevation change}$$

Untuk memahami perbedaan tingkat kerentanan mangrove terhadap SLR di setiap wilayah, metode pemantauan dipadukan dengan kajian pengaruh faktor lainnya pada perubahan elevasi tanah, antara lain sedimen yang masuk dan tersimpan di hutan mangrove (*sediment deposition*), erosi, *sediment compaction*, *sediment shrink-swell*, pertumbuhan akar, proses dekomposisi dan akumulasi zat organik^{13,17,19}. Faktor tersebut dapat berbeda di setiap hutan mangrove sehingga kemampuan adaptasi mangrove terhadap kenaikan muka laut akan berbeda-beda¹⁷. *Soil compaction*, *sediment shrinkage* dan proses dekomposisi zat organik merupakan faktor yang menyebabkan penurunan elevasi tanah dan *shallow subsidence*²⁰. Sebaliknya, elevasi tanah akan meningkat bila volume tanah (*soil volume*) bertambah akibat pertumbuhan akar, input sedimen, akumulasi zat organik atau proses *soil swell*^{17,21}. Secara tidak langsung faktor hidrologi juga memberikan kontribusi terhadap perubahan elevasi, seperti curah hujan yang dapat mempengaruhi pertumbuhan akar dan resapan air dari laut atau sungai yang meningkatkan volume tanah^{16,19}.

Prediksi SLR terhadap tren perubahan elevasi permukaan tanah yang diperoleh dari hasil pengukuran *multi-years* dapat dianalisa lebih lanjut untuk mendapatkan tingkat kerentanan mangrove terhadap SLR. Dengan menggunakan model prediksi, seperti SLAMM (*Sea Level Affecting Marshes Model*), kerentanan mangrove dapat diprediksi melalui pendekatan simulasi

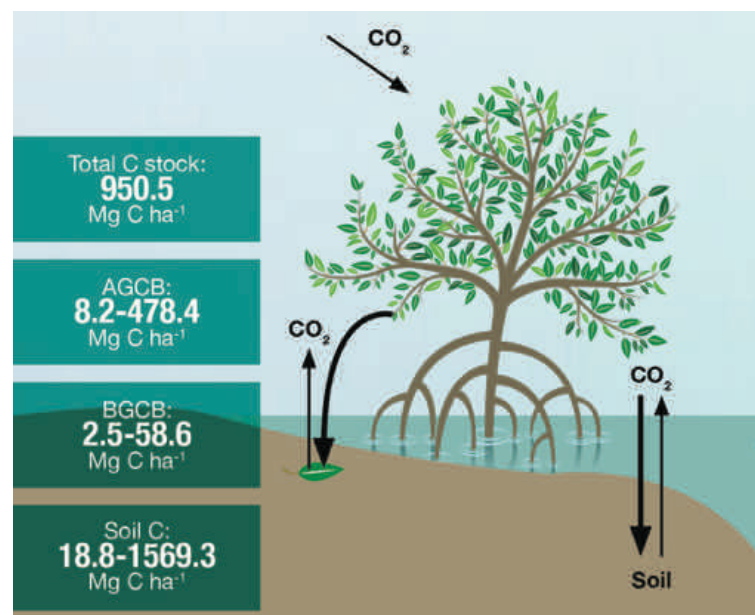
perubahan lanskap lokasi studi terhadap beberapa skenario SLR (Gambar 4)²².



Gambar 4. Prediksi adaptasi mangrove di Perancak Bali dalam merespon SLR dengan menggunakan Model SLAMM (*Sea Level Affecting Marshes Model*).

Bab 4. Karbon Biru: Mangrove sebagai ekosistem pesisir penyerap dan penyimpan karbon

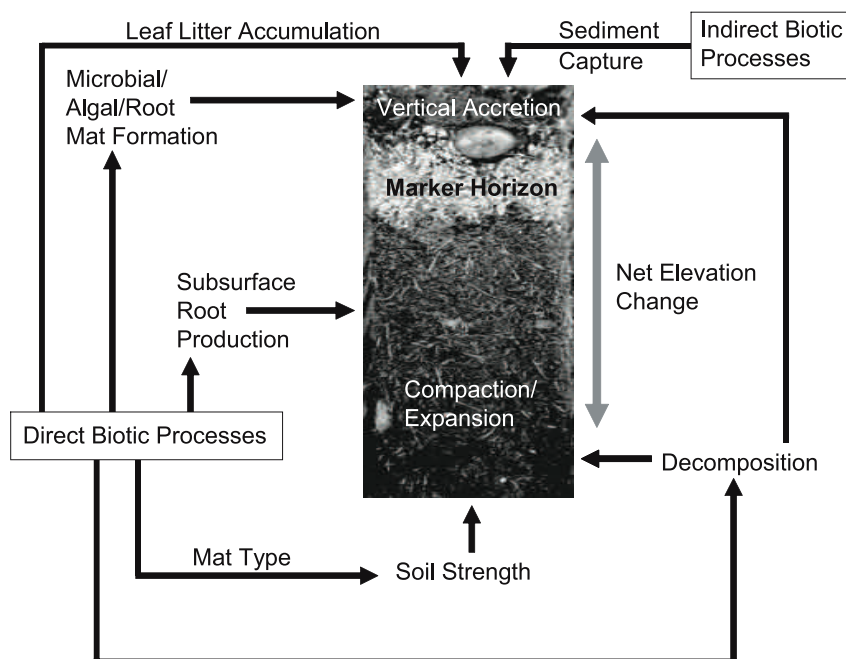
Hutan mangrove berperan penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui siklus karbon, yaitu dengan menyerap CO₂ dari atmosfer, dan menyimpan karbon dalam biomassa (daun, batang dan akar) serta materi organik dalam tanah. Karbon yang terserap dan tersimpan dalam ekosistem pesisir dan laut disebut karbon biru (*blue carbon*). Mangrove, padang lamun, dan rawa asin merupakan ekosistem karbon biru di pesisir (*coastal blue carbon ecosystem*) yang memiliki ciri menyimpan lebih banyak karbon di dalam tanah. Apabila ekosistem ini terdegradasi, karbon yang tersimpan akan dilepaskan dan memberikan kontribusi pada peningkatan emisi gas rumah kaca.



Gambar 5. Siklus penyerapan, penyimpanan dan pelepasan karbon biru dalam ekosistem mangrove. Jumlah stok karbon merupakan rata-rata nilai stok karbon mangrove Indonesia²³. Keterangan: AGBB: aboveground biomass (biomassa bagian atas, BGCB: belowground biomass (biomassa bagian bawah).

Estimasi penyerapan karbon

Mangrove memiliki luas area yang relatif kecil dibandingkan dengan hutan terestrial (<1% dari total hutan tropis), namun memberikan kontribusi sekitar 3% dari total penyerapan karbon oleh hutan tropis dunia²⁴. Kapasitas penyerapan karbon yang sangat tinggi terdapat di bagian kantong tanah (*soil pool*) dimana karbon dapat tersimpan hingga ratusan tahun, sehingga kantong ini merupakan *long-term carbon pool* yang bernilai penting untuk menentukan potensi mitigasi mangrove³. Perubahan yang terjadi pada *soil pool* dapat dikaji dengan melakukan pemantauan dinamika elevasi permukaan tanah menggunakan metode RSET³. Penggunaan metode RSET dalam jangka panjang akan memberikan tren elevasi sekaligus gambaran proses yang terjadi di lapisan sub permukaan tanah, seperti pertumbuhan akar dan *auto-compaction*¹⁵.



Gambar 6. Skema perubahan elevasi permukaan tanah yang disebabkan oleh faktor biotik dan abiotik (sumber: Cahoon et al, 2006).

Bersamaan dengan pengukuran dinamika *soil pool*, penyerapan karbon oleh vegetasi mangrove (*above and belowground biomass*) dapat diestimasi dengan menghitung nilai produktivitas primer bersih (*Net Primary Production, NPP*) yang terdiri dari tegakan dan batang pohon (*aboveground*

biomass), serasah (*litter*) dan akar (*root production*)^{24,25}. Seiring dengan pertumbuhannya, mangrove menyimpan karbon hasil fotosintesis dalam bentuk biomassa²⁵. Serasah daun yang gugur ke tanah (*leaf litter*) dan akar yang tumbuh (*root production*) tidak hanya diperhitungkan sebagai bagian dari biomassa vegetasi mangrove tetapi juga menjadi faktor biotik yang memberikan kontribusi pada perubahan elevasi tanah¹⁷. Seperti yang diilustrasikan Gambar 6, serasah yang jauh akan terdekomposisi dalam tanah dan menjadi bahan organik di dalam tanah yang berkontribusi pada akresi vertikal. Sedangkan pertumbuhan akar akan menambah volume tanah dan meningkatkan elevasi permukaan tanah. Metode yang digunakan untuk menghitung NPP terdapat dalam Lampiran SOP 3.

Menghitung stok karbon

Karbon organik yang tersimpan dalam ekosistem mangrove dihitung sebagai stok karbon. Salah satu tujuannya adalah untuk memperkirakan CO₂ yang terlepas apabila terjadi degradasi hutan¹⁵. Stok karbon yang dihitung adalah total karbon yang tersimpan pada vegetasi mangrove dan tanah pada kedalaman tertentu, dengan unit megagram karbon organik per hektar (MgC/ha)³. Total stok karbon terdiri dari kantong karbon:

1. *Aboveground living biomass* (pohon, akar nafas, semai)
2. *Aboveground dead biomass* (serasah, jatuhan kayu, pohon mati)
3. *Belowground living biomass* (akar halus, rhizoma)
4. *Soil carbon* (tanah)

Penghitungan stok karbon mangrove sebagai karbon biru menggunakan metode yang telah ditetapkan secara ilmiah oleh Howard et al. (2014) dan Kauffman & Donato (2012). Metode dijelaskan pada lampiran SOP 7.

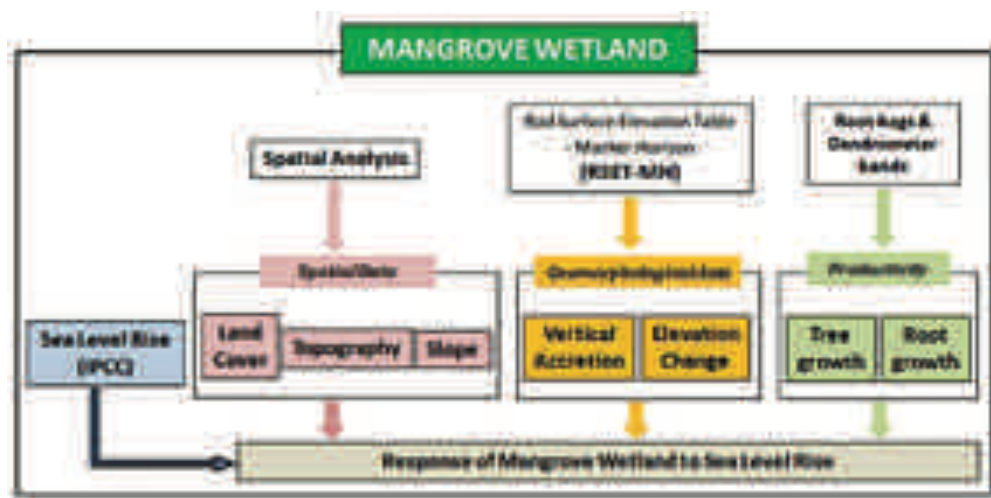
Daftar Pustaka

1. Cahoon, D. R. & Guntenspergen, G. R. Climate Change, Sea-Level Rise, and Coastal Wetlands. *National Wetlands Newsletter* **32**, 8–12 (2010).
2. McIvor, A., Spencer, T., Möller, I. & Spalding, M. *The response of mangrove soil surface elevation to sea level rise. Natural Coastal Protection Series: Report 3. Cambridge Coastal Research Unit Working Paper 42.* (2013).
3. *Coastal blue carbon. Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows.* (Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, 2014).
4. Alongi, D. M. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science* **6**, 195–219 (2014).
5. Giri, C. *et al.* Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography* **20**, 154–159 (2011).
6. Giesen, W., Wulffraat, S., Zieren, M. & Scholten, L. *Mangrove guidebook for Southeast Asia.* (FAO, 2006).
7. Barbier, E. B. *et al.* The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs* **81**, 169–193 (2011).
8. Ruitenbeek, J. *Mangrove management: An economic analysis of management options with a focus on Bintuni Bay, Irian Jaya.* (1992).
9. Ambarita, S. T. *et al.* Landscape planning and economic valuation of mangrove ecotourism using GIS and Google Earth Image. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* **96**, 6306–6317 (2018).
10. Cabrera, B. M. A., Seijo, C. & Euan, J. Economic values of ecological services from a mangrove ecosystem. *Intercoast Network* **32**, 1–2 (1998).
11. Furukawa, K. & Wolanski, E. Sedimentation in mangrove forests. *Mangroves and Salt Marshes* **1**, 3–10 (1996).
12. Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I. & Marbà, N. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change* **3**, 961–968 (2013).
13. Gilman, E. L., Ellison, J., Duke, N. C. & Field, C. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. *Aquatic Botany* **89**, 237–250 (2008).
14. Lovelock, C. E. & Ellison, J. in *Climate Change and Great Barrier Reef* 237–269 (Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, 2007).
15. Alongi, D. M. *Blue Carbon: Coastal sequestration for climate change mitigation.* (Springer, 2018).
16. Cahoon, D. R. & Lynch, J. C. Vertical accretion and shallow subsidence in a mangrove forest of southwestern Florida, USA. *Mangrove and Salt Marshes* **1**, 173–186 (1997).
17. Cahoon, D. R. *et al.* in *Ecological Studies* (eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink & D.F. Whigham) **190**, (Springer Berlin Heidelberg, 2006).
18. Cahoon, D. R., Reed, D. J. & Day, J. W. Estimating shallow subsidence in microtidal salt marshes of the southeastern United States: Kaye and Barghoorn revisited. *Marine Geology* **128**, 1–9 (1995).
19. Krauss, K. W. *et al.* How mangrove forests adjust to rising sea level. *New Phytologist*

- (2013). doi:10.1111/nph.12605 Key
20. Rybczyk, J. M. & Cahoon, D. R. Estimating the potential for submergence for two wetlands in the Mississippi River Delta. *Estuaries* **25**, 985–998 (2002).
 21. Whelan, K. R. T. *et al.* Groundwater control of mangrove surface elevation : shrink and swell Varies with soil depth. *Estuaries* **28**, 833–843 (2005).
 22. Mcleod, E., Poulter, B., Hinkel, J., Reyes, E. & Salm, R. Sea-level rise impact models and environmental conservation: A review of models and their applications. *Ocean & Coastal Management* **53**, 507–517 (2010).
 23. Alongi, D. M. *et al.* Indonesia’s blue carbon: a globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbon. *Wetlands Ecology and Management* **24**, 3–13 (2016).
 24. Alongi, D. M. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management* **3**, 313–322 (2012).
 25. Clark, D. A. *et al.* Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications* **11**, 356–370 (2001).
 26. Lynch, J. C., Hensel, P. & Cahoon, D. R. *The surface elevation table and marker horizon technique: A protocol for monitoring wetland elevation dynamics. Natural Resource Report NPS/NCBN/NRR—2015/1078.* (2015).
 27. Cahoon, D. R. *et al.* High-precision measurements of wetland sediment elevation: II. The rod surface elevation table. *Journal of Sedimentary Research* **72**, 734–739 (2002).
 28. Badan Informasi Geospasial. *Pedoman Teknis Pengumpulan dan Pengolahan Data Geospasial Mangrove.* (2014).
 29. Webb, E. L. *et al.* A global standard for monitoring coastal wetland vulnerability to accelerated sea-level rise. *Nature Climate Change* **3**, 458–465 (2013).
 30. Kauffman, J. B. & Donato, D. C. *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests.* (2012).
 31. Kauffman, J. B. & Cole, T. G. Micronesian mangrove forest structure and tree responses to a severe typhoon. *Wetlands* **30**, 1077–1084 (2010).
 32. Dharmawan, I. W. S. & Siregar, C. A. Karbon tanah dan pendugaan karbon tegakan *Avicennia marina* (forsk.) Vierh di Ciasem, Purwakarta. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam* **4**, 317–328 (2008).
 33. Clough, B. & Scott, K. Allometric relationships for estimating above- ground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology and Management* **27**, 117–127 (1989).
 34. Komiyama, A., Pongpan, S. & Kato, S. Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal Tropical Ecology* **21**, 21, 471–477. (2005).
 35. Comley, B. W. T. & McGuinness, K. A. Above- and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. *Australian Journal of Botany* **53**, 431 (2005).

SOP 1: Pemilihan lokasi stasiun

Stasiun monitoring mangrove adalah plot permanen mangrove yang dibangun guna memperoleh data yang akan digunakan untuk prediksi adaptasi mangrove terhadap kenaikan muka laut dan pendugaan penyerapan karbon biru. Kegiatan monitoring yang dilakukan terbagi dua bagian utama, yaitu biomassa dan tanah. Biomassa pohon yang dihitung meliputi tegakan pohon (*aboveground*) dan akar (*belowground*). Sedangkan bagian tanah difokuskan pada geomorfologi dan karakteristik tanah. Gambar 7 menjelaskan skema kegiatan pengukuran periodik yang dilakukan dalam stasiun, yaitu perubahan elevasi permukaan tanah, akresi vertikal, pertumbuhan mangrove dan akar. Kegiatan tersebut dapat dipadukan dengan pengambilan data spasial dan pengukuran rutin parameter lainnya, seperti pasang surut, curah hujan, dan kualitas air, untuk mendapatkan gambaran detail mengenai kondisi lokasi studi.



Gambar 7. Skema kegiatan pengukuran yang dilakukan di stasiun monitoring.

Hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan lokasi stasiun:

1. Alasan pemilihan lokasi
 - a. Karakteristik lokasi: geomorfologi, tipe hutan mangrove;
 - b. Tujuan monitoring atau *research interest*;
 - c. Jumlah sampel yang dibutuhkan.
2. Faktor pendukung pelaksanaan pemantauan dalam jangka panjang

- a. Kemudahan aksesibilitas ke lokasi;
- b. Dukungan masyarakat lokal (izin dan keamanan);
- c. Biaya instalasi dan operasional kegiatan yang terjangkau.

Teknik pemilihan lokasi studi dapat dilakukan dengan metode *Geographical Information Systems (GIS)*, dengan langkah sebagai berikut:

1. Tentukan lokasi studi dengan memperhatikan alasan pemilihan lokasi dan faktor pendukung lainnya;
2. Identifikasi kondisi dan karakteristik lokasi studi untuk menentukan site (*area of interest*), contoh jenis habitat, kondisi geomorfologi, keunikan lokasi, dll;
3. Setelah penentuan *site*, perkirakan lokasi penempatan stasiun. Hindari: posisi yang sangat dekat dengan sungai (<2 m), akses yang jauh dan sulit ditempuh (>100 m dari akses terdekat), dan penempatan yang terlalu berdekatan dengan stasiun lainnya (kurang dari <10 m)²⁶;
4. Titik-titik lokasi stasiun disimpan dalam GPS atau peta untuk dicek di lapangan. Apabila kurang sesuai, tandai lokasi sebagai titik baru.

Menurut Lynch et al. (2015), pilihan distribusi penempatan lokasi stasiun terbagi tiga, yaitu:

1. Menyebar acak di seluruh lokasi studi;
2. Penempatan satu stasiun di setiap *area of interest*;
3. Penempatan beberapa stasiun di setiap *area of interest*.



1. Tanpa pembagian site
+ Memberikan gambaran umum lokasi studi.
- Akses yang jauh dapat mempersulit monitoring.



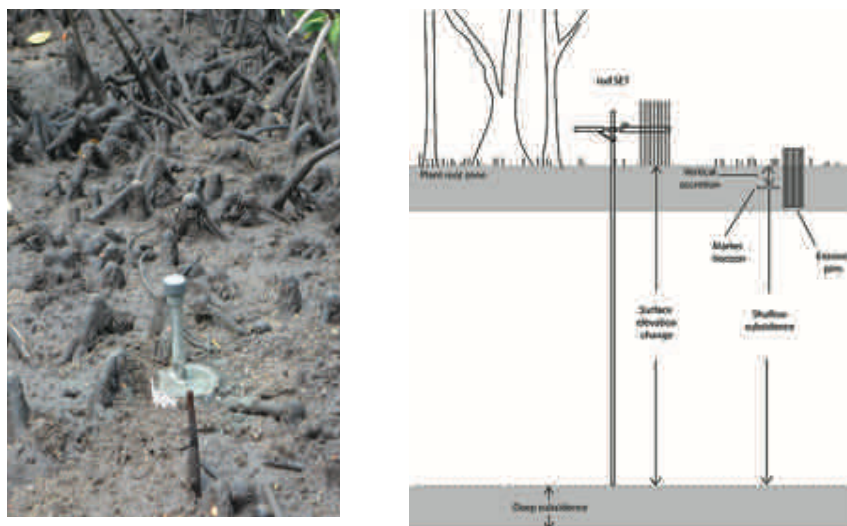
2. Satu stasiun/site
+ Mewakili kondisi khusus lokasi studi.
- Tidak mewakili kondisi keseluruhan lokasi studi karena setiap stasiun belum tentu mewakili site.



3. Beberapa stasiun/site
+ Kemudahan akses dan dapat dilakukan analisa site comparison.
- Tidak mewakili kondisi keseluruhan lokasi studi.

SOP 2: Instalasi RSET - MH

Metode RSET-MH (*Rod Surface Elevation Table – Marker Horizon*) dikembangkan oleh Cahoon et al. (2002) dan bertujuan untuk memberikan tren elevasi permukaan tanah, akresi vertikal dan *shallow subsidence* yang terjadi di ekosistem lahan basah dengan resolusi tinggi (Cahoon and Gutenspergen, 2010). Untuk mendapatkan data jangka panjang yang konsisten, pengukuran harus dilakukan di plot permanen yang disebut *benchmark* RSET (Gambar 8).

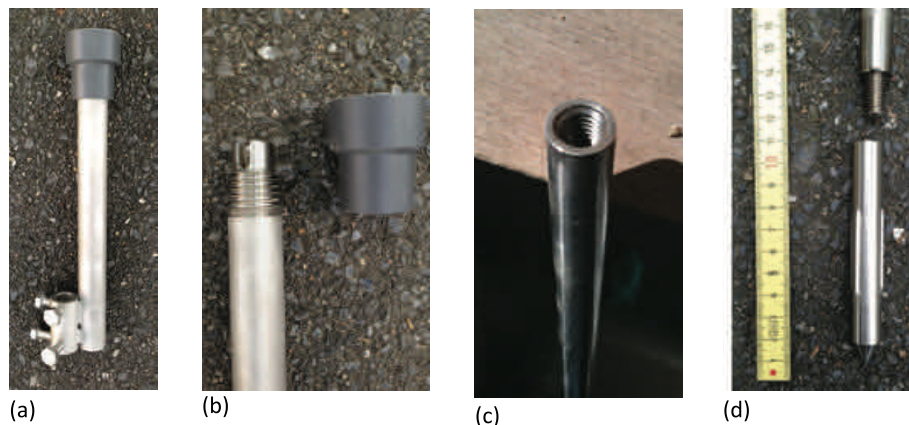


Gambar 8. Ilustrasi benchmark RSET yang telah terpasang.

Peralatan dan bahan yang dibutuhkan dalam instalasi *benchmark* RSET:

1. Pancang *stainless steel* solid ukuran panjang 120cm, diameter 15mm (9/16 inci) dengan alur untuk sekrup di kedua ujung;
2. Ujung pancang bentuk lancip sebagai penembus tanah. Hanya dipasang pada pancang pertama;
3. Ujung pancang bentuk *full solid* sebagai penumpu alat bor;
4. *Receiver* dan tutup PVC sebagai penghubung dengan alat pengukur;
5. Sekrup yang dipasang di kedua ujung pancang dan *receiver*;
6. PVC diameter 15 cm (6 inchi) sepanjang 40-50 cm sebagai tempat dasar *benchmark*.
7. Bor atau palu khusus;

8. Genset *portable* bila menggunakan bor. Sambungkan dengan *ground* listrik dengan menggunakan pancang;
9. Gerinda pemotong besi;
10. Semen dan pasir untuk mengecor PVC;
11. Papan atau bambu yang digunakan untuk platform tempat kerja;
12. Alat lainnya: grip, sekop, ember, kompas, sarung tangan, helm, dan kacamata pelindung (Gambar 10).



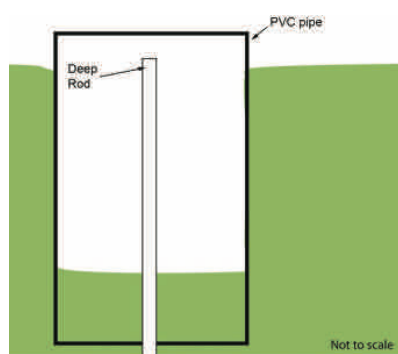
Gambar 9. Peralatan yang dibutuhkan: *receiver* dan tutup PVC (a dan b), pancang *stainless steel solid* dengan ulir di dalam (c) dan ujung pancang runcing (d). Semua peralatan dibuat khusus oleh bengkel besi. Sumber: Lynch et al. (2015).



Gambar 10. Alat dan bahan yang diperlukan sesuai daftar.

Cara instalasi *benchmark* RSET:

1. Tentukan lokasi *benchmark* dan tempatkan PVC di tanah. Tanam PVC sedalam 30 cm dan gali tanah dengan sekop. Sisa PVC akan terlihat di atas permukaan tanah. Perkirakan sedimentasi di lokasi studi untuk menetapkan ketinggian PVC di atas permukaan tanah. Bila sedimentasi tinggi, disarankan ketinggian PVC lebih dari 10 cm di atas permukaan tanah.



Sumber: Lynch et al (2015)



2. Dengan menggunakan tangan, masukan pancang pertama dengan besi lancip di ujung untuk mempermudah penetrasi ke dalam tanah. Masukan pancang satu persatu dan sambung dengan sekrup. Gunakan *grip* untuk mengencangkan sambungan antar pancang.



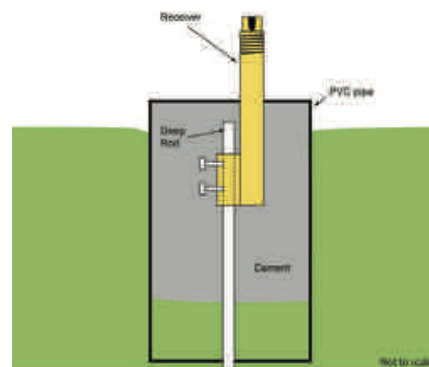
3. Ketika mulai sulit menebus tanah, menggunakan bor atau palu khusus. Gunakan ujung solid sebagai bantalan bor yang disambung dengan

sekrup agar ujung pancang tetap utuh dan mudah untuk disambung. Lakukan penanaman pancang hingga kedalaman mencapai dasar tanah (*bedrock*).



Sumber: Lynch et al (2015)

4. Setelah mencapai dasar, pancang yang tersisa dipotong dengan menggunakan gerinda. Ketinggian sisa pancang disesuaikan sejajar dengan ketinggian PVC di atas permukaan tanah. Sisa pancang digunakan untuk dasar penempatan *receiver*. Atur posisi *receiver* dengan lubang 'U' mengarah ke utara. Hal ini akan mempermudah pengukuran rutin dan konsistensi data. Kencangkan *receiver* dengan sekrup dan pasang penutup.

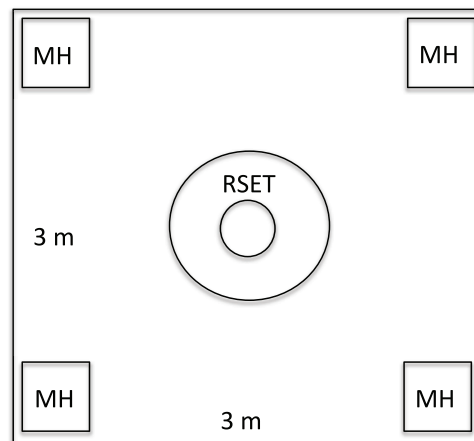


Sumber: Lynch et al (2015)

5. Isi lubang PVC dengan semen dan pasir hingga padat. Lakukan hal ini jauh sebelum waktu pasang untuk mempercepat pengeringan semen. Sebelum semen kering, tandai dengan kode lokasi.



Marker horizon (MH) berupa kapur yang ditabur disekitar *benchmark* RSET untuk mendapatkan data akresi vertikal tanah. Tandai lokasi penaburan kapur karena tanah akan menutupi lapisan kapur dan mempersulit penemuan lokasi kapur. Bila sedimentasi sangat tinggi, metode MH dapat digantikan dengan tongkat (*erosion pins*) atau pipa kecil (*sediment trap*).



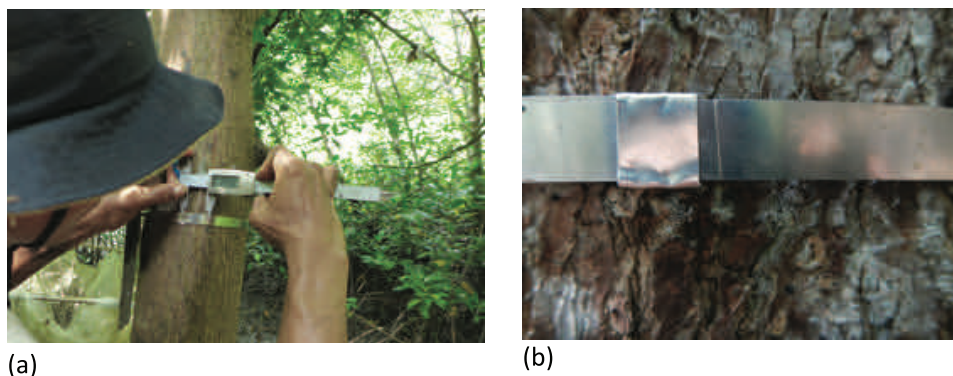
Gambar 11. Posisi penebaran kapur MH di sekitar *benchmark* RSET.

SOP 3: Pemantauan produktivitas mangrove

Selain pengukuran parameter geomorfologi, pengkajian dinamika ekosistem mangrove juga dilakukan dengan memantau produktivitas mangrove, yaitu melalui pengukuran pertumbuhan tegakan mangrove, produksi serasah, dan produktivitas akar.

Pertumbuhan mangrove

Pertumbuhan mangrove diukur dari diameter tegakan pohon setinggi dada (*diameter at breast height*, DBH, 130 cm). Pada plot permanen, pengukuran rutin dilakukan dengan menggunakan *dendrometer*, yaitu gelang metal pengukur pertumbuhan pohon. Alat ini dipasang di pohon yang hidup dan dilingkarkan pada tegakan pohon setinggi DBH. Pemilihan pohon dilakukan secara acak (random) sehingga dapat mewakili karakteristik hutan mangrove di lokasi studi. Pengukuran dilakukan dengan menghitung pertambahan panjang daerah irisan *dendrometer*, mulai dari garis awal yang ditandai pada saat *dendrometer* dipasang hingga garis akhir saat pengukuran. Tanda tersebut merupakan indikator pertambahan diameter tegakan pohon yang kemudian dikonversi ke dalam nilai basal area (cm^2/tahun) dan laju pertumbuhan pohon.



Gambar 12. Penggunaan jangka sorong *caliper* (a) untuk mengukur panjang daerah irisan *dendrometer* yang menandakan pertumbuhan pohon (b).

Alat dan bahan yang dibutuhkan untuk membuat *dendrometer*:

1. Plat dan per kecil *stainless steel*
2. Plat label dan kawat *stainless steel*

3. Pisau kecil untuk menggores
4. Tang, gunting, dan pembolong plat

Jaring serasah

Jaring serasah digunakan untuk mengumpulkan serasah mangrove yang jatuh di permukaan tanah dan berkontribusi pada penambahan volume tanah. Serasah yang masuk ke dalam jaring diasumsikan sebagai jumlah serasah per luasan area (ukuran jaring). Jaring berukuran 50 x 50 cm dan digantung pada batang pohon agar terhindar dari gangguan. Jatuhan serasah dalam jaring diambil secara berkala untuk mengetahui rata-rata produksi serasah di setiap lokasi pengukuran.



Umumnya serasah yang diambil berupa daun atau campuran daun dan bunga. Serasah dimasukan dalam oven sekitar 60 °C hingga kering dan ditimbang untuk dianalisis sebagai berat kering per luasan area.

Kantong akar



Kantong akar menggunakan jaring plastik (waring) yang dibentuk seperti sosis sepanjang 20-30 cm. Kantong dipadatkan dengan tanah bebas akar, lalu ditanam pada posisi vertikal ke dalam tanah yang telah digali dengan *coring*. Untuk mempermudah pengambilan, salah satu ujung kantong diikat dengan tali pancing dan dieratkan di batang atau akar pohon terdekat. Setelah pengangkatan sampel, kantong dicuci hingga bersih dan diambil akarnya untuk dioven sekitar 60 °C hingga kering. Dari hasil berat kering akan diperoleh produksi akar per volume kantong, lalu dikonversikan per luasan area.

SOP 4: Identifikasi karakteristik ekosistem

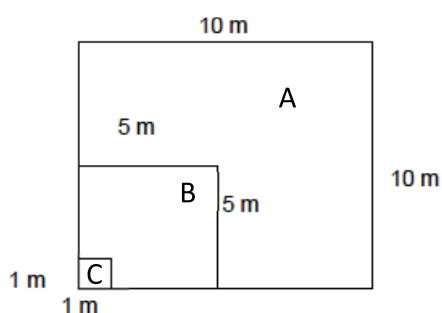
Setelah alat monitoring terpasang, identifikasi karakteristik lingkungan dilakukan untuk mendapatkan informasi rona awal lokasi studi. Kegiatan yang dilakukan meliputi:

- Pengamatan struktur komunitas mangrove
- Penentuan pasang surut
- Analisa karakteristik sedimen

Struktur komunitas mangrove

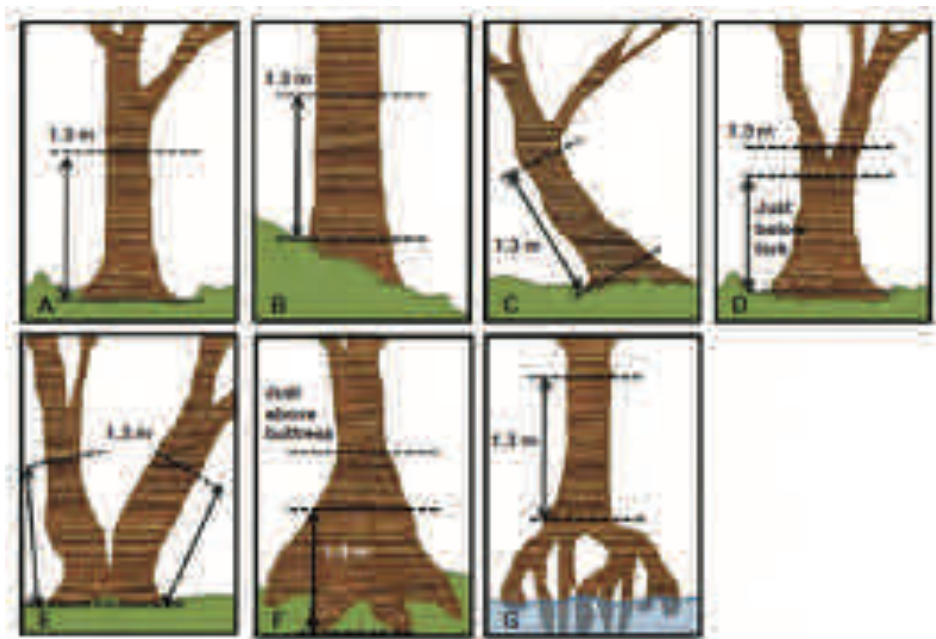
Identifikasi jenis mangrove dapat dilakukan dengan menggunakan foto atau gambar dari buku panduan atau dengan menggunakan kunci identifikasi mangrove. Seperti jenis pohon lainnya, identifikasi dilakukan dengan memperhatikan bentuk pohon (*tree*), struktur akar (*roots*), bentuk buah (*propagule/fruit*), bentuk dan susunan daun (*leaves*), dan rangkaian bunga (*flowers*). Pengamatan struktur dan komposisi vegetasi mangrove dilakukan menggunakan metode sampel plot yang terbagi atas subplot sesuai dengan strata pertumbuhan (semai, pancang, dan pohon)²⁸. Kegiatan yang dilakukan dalam setiap plot:

- Mencatat lokasi pengambilan sampel dengan menggunakan GPS dan mengambil dokumentasi foto pada empat arah mata angin;



- Pada subplot A (10 x 10 cm): ukur diameter dan tinggi semua pohon dengan DBH ≥ 10 cm dan catat nama spesies mangrove. Lihat tata cara pengukuran pohon pada Gambar 13;

- Pada subplot B (5 x 5 cm): ukur diameter dan tinggi semua pancang dan pohon yang memiliki DBH antara 2 cm hingga ≤ 10 cm dan tinggi > 2 m, dan catat nama spesies mangrove;
- Pada subplot C (1 x 1 cm): hitung jumlah individu per spesies mangrove.



Gambar 13. Pengukuran berdasarkan DBH pohon (sumber: Howard et al, 2014)

Data dari setiap plot digunakan untuk menganalisis struktur komunitas hutan mangrove dengan persamaan di bawah ini:

$$DBH = \frac{CBH}{\pi}$$

DBH = diameter tegakan pohon (cm)

CBH = lingkaran tegakan pohon (cm)

$\pi = 3,14$

$$BA = \frac{\pi DBH^2}{4}$$

BA = basal area

DBH = diameter

$$D = \frac{n}{A}$$

D = kerapatan jenis tertentu (batang/ha)

n = jumlah total tegakan dari jenis tertentu

A = luas total area plot

$$RD = \left[\frac{n}{\sum n} \right] \times 100$$

RD = kerapatan relatif jenis tertentu

n = jumlah total tegakan dari jenis tertentu

$\sum n$ = luas total tegakan seluruh jenis

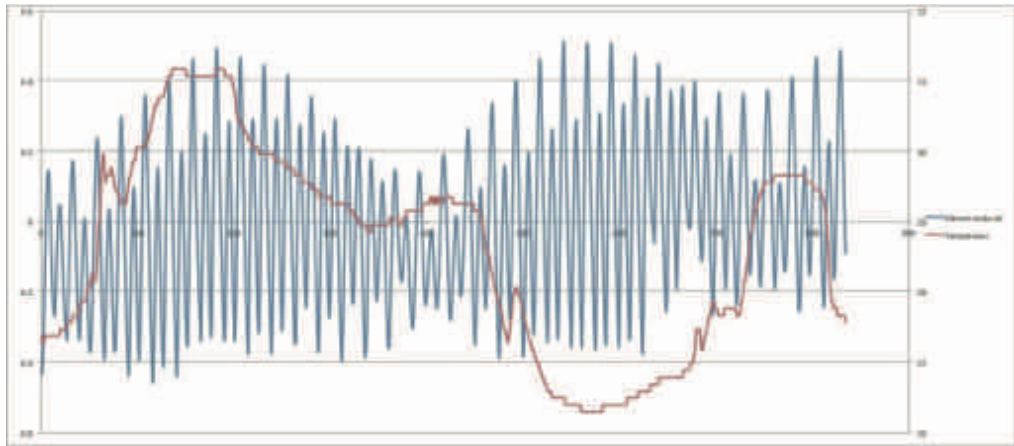
$$F = \frac{p}{\sum p}$$

F = frekuensi jenis tertentu

	p = jumlah plot ditemukan jenis tertentu Σp = jumlah total plot
$RF = \left[\frac{F}{\Sigma F} \right] \times 100$	RF = nilai frekuensi relatif F = frekuensi jenis tertentu ΣF = jumlah frekuensi seluruh jenis
$C = \frac{\Sigma BA}{A}$	C = penutupan jenis BA = luas penutupan jenis (basal area) A = luas plot
$RC = \left[\frac{C}{\Sigma C} \right] \times 100$	RC = penutupan relatif jenis C = luas area penutupan jenis tertentu ΣC = luas total area penutupan seluruh jenis
$INP = RD + RF + RC$	INP = Indeks Nilai Penting
$H' = \log N - \frac{1}{N} \sum n_i \log n_i$	H' = Indeks Kenanekaragaman Shannon n_i = jumlah individu spesies ke-i N = jumlah total individu seluruh spesies
$J' = \frac{H'}{\ln(S)}$	J' = Indeks Keseragaman spesies H' = Indeks Kenanekaragaman Shannon S = jumlah spesies
$D = \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$	D = Indeks Dominasi N_i = jumlah individu spesies ke-i N = jumlah total individu

Pemantauan pasang surut

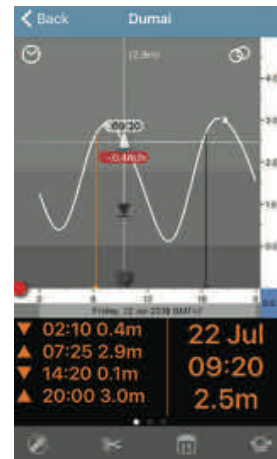
Data pasang surut diperoleh dari alat *water level logger* yang merekam elevasi muka air (Gambar 14). Alat dapat dipasang di akar mangrove yang tumbuh di pinggir sungai terdekat (Gambar 15) atau tiang pancang. Bila alat tidak tersedia, data pasang surut dapat diperoleh dari website (<https://www.worldtides.info>) atau aplikasi *handphone* seperti Gambar 16.



Gambar 14. Data elevasi muka air (biru) dan temperatur permukaan air (merah) yang direkam oleh *water level logger*.



Gambar 15. *Water level logger* yang terpasang di akar mangrove .



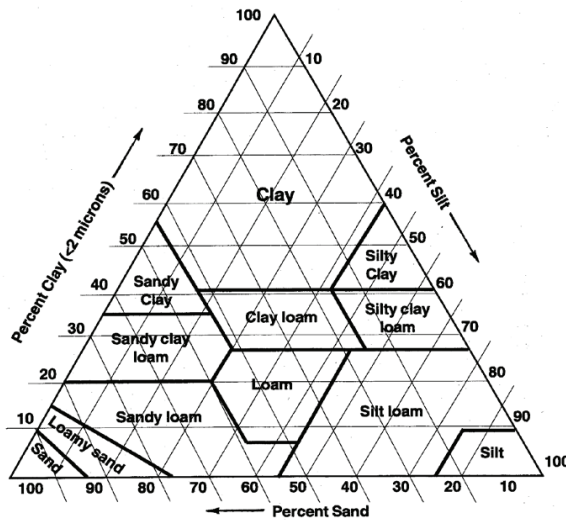
Gambar 16. Tampilan aplikasi pasang surut pada *handphone*.

Analisa karakteristik sedimen

Sampling sedimen dilakukan untuk mengetahui karakteristik tanah seperti tekstur tanah, salinitas air permukaan tanah (*porewater salinity*), porositas dan bobot isi tanah (*bulk density*). Data tersebut merupakan informasi awal yang dapat digunakan untuk analisis lanjutan, contohnya analisis karbon tanah, sedimentasi, dan distribusi mangrove.



Pengambilan sampel tanah dilakukan dengan menggunakan alat yang telah diketahui volumenya, seperti suntikan atau pipa PVC. Sampel ditimbang (sebagai berat basah) dan kemudian dioven untuk mendapatkan berat kering. Penentuan tekstur tanah dapat dilakukan dengan menggunakan segitiga tekstur (Gambar 17). Tanah yang sudah dikeringkan dianalisis ukuran butir dan jenisnya menggunakan metode ayak pada saringan bertingkat (*sieve analysis*).



Gambar 17. Segitiga Sheppard untuk penentuan jenis sedimen berdasarkan tekstur.

Dari data tersebut, dapat diperoleh nilai *bulk density*, porositas, dan tekstur tanah, dengan persamaan:

$$\text{Bulk density (g/cm}^3\text{)} : \frac{\text{Berat kering (g)}}{\text{Volume (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Particle density} = 2.65\text{g/cm}^3$$

$$\text{Porositas (\%)} : 1 - \left(\frac{\text{Bulk density}}{\text{particle density}} \right)$$

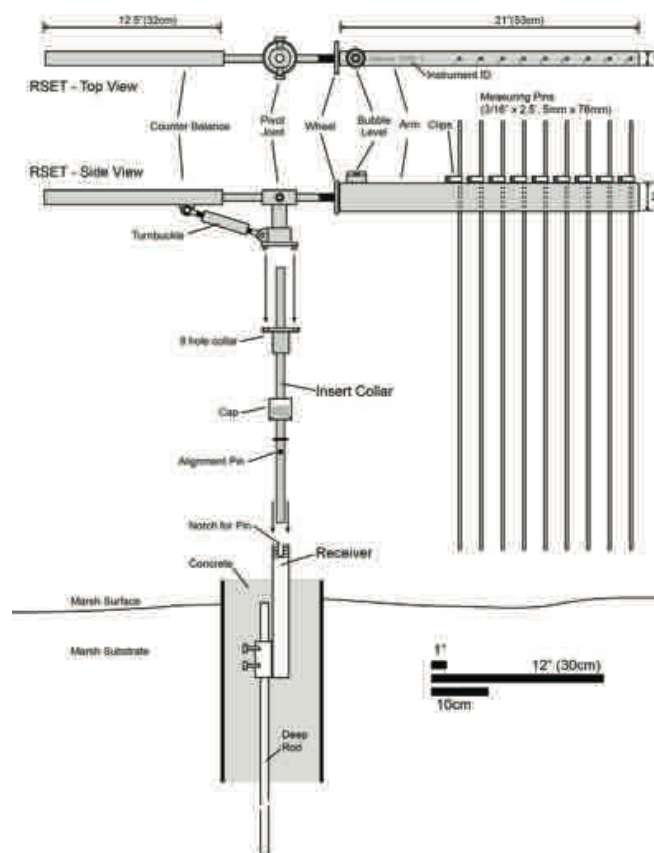
Porewater salinity diperoleh dari sampel air yang diambil pada kedalaman tanah ~20-30 cm, dengan asumsi kedalaman tersebut merupakan zona pertumbuhan akar mangrove. Sampel air disimpan dalam wadah dan didiamkan sejenak agar campuran sedimen mengendap. Air yang jernih diambil dengan pipet dan diteteskan pada refraktometer untuk pengukuran salinitas.

SOP 5: Pengukuran elevasi tanah dengan RSET

Rod Surface Elevation Table (RSET) dapat memberikan informasi tentang dinamika perubahan elevasi permukaan tanah yang terjadi di lahan basah (termasuk mangrove) dengan tingkat akurasi yang tinggi untuk pengukuran vertikal tanah yaitu sekitar $\pm 1.0 - 1.5 \text{ mm}$ ²⁷, sehingga metode ini merupakan metode terbaik untuk mengukur elevasi permukaan tanah lahan basah²⁹. Pengukuran dilakukan secara periodik dan berulang untuk mendapatkan nilai perubahan elevasi permukaan tanah terhadap SLR relatif dan faktor yang berpengaruh terhadap perubahan elevasi. Alat pengukur RSET (Gambar 18) ditempatkan pada *benchmark* RSET (lihat Gambar 8, SOP 2) yang menjadi datum pengukuran.

Hal yang perlu diperhatikan dalam pengambilan data menggunakan RSET:

1. Pengambilan data dilakukan secara periodik pada waktu atau kondisi yang serupa. Contoh, pengambilan data per musim atau pada bulan tertentu (Januari/Februari atau Juni/Juli). Pada awal monitoring, pengambilan data dilakukan minimal sekali dalam satu tahun;
2. Pengambilan data dilakukan pada saat surut dan cuaca baik (tidak hujan) untuk menghindari genangan air sehingga mempermudah pengukuran permukaan tanah;
3. Untuk menghindari bias pembacaan, pengukuran elevasi permukaan tanah hanya dilakukan oleh satu orang petugas tetap. Tidak disarankan untuk mengganti petugas pengukur RSET;
4. Setiap saat monitoring, sediakanlah pembersih karat dan lap yang dapat digunakan untuk membersihkan karat atau kotoran tanah;
5. Tulislah angka pada pin pengukur dengan spidol sehingga pin yang sama ditempatkan secara berurutan sesuai nomor;
6. Hindari menginjak tanah di sekitar *benchmark* karena akan mempengaruhi kondisi permukaan tanah. Gunakan papan bangku panjang sebagai alas sehingga pengukuran dapat dilakukan tanpa menyentuh tanah sekitar *benchmark*;
7. Pada pencatatan data, informasi yang disimpan antara lain: kode *benchmark* dan stasiun, tanggal dan waktu, nama personil lapangan, kondisi permukaan tanah, kondisi pasang surut, data RSET, dan catatan khusus lainnya.



Gambar 18 . Alat pengukur RSET, berbentuk palang lengan (*arm*), yang ditempatkan pada *benchmark* RSET (sumber: Lynch et al, 2015).

Tata cara pengukuran:

1. Buka tutup PVC *receiver*. Bersihkan bagian atas *receiver*;
2. Tempatkan tongkat RSET pada dudukan di *receiver* (bentuk U) dan kencangkan pengunci di tongkat RSET;

3. Letakkan *arm* RSET pada dudukan di tongkat dan eratkan dengan menggunakan penjepit. Atur posisi seimbang dengan menggunakan *waterpas*;
4. Cek nomor pada dudukan tongkat (1,3,5, atau 7) dan catat sebagai arah posisi pengukuran. Pengukuran dilakukan pada empat arah;
5. Turunkan pin satu persatu secara perlahan hingga menyentuh tanah. Jepit pin untuk menghindari masuknya pin ke dalam tanah;
6. Gunakan penggaris untuk mengukur tinggi pin di atas RSET sebagai data elevasi. Lakukan sembilan pengukuran dalam satu arah dan berikan catatan apabila terdapat kondisi tertentu (lobang, gundukan, jejak kaki, ranting, akar; dan daun);
7. Setelah selesai, angkat seluruh pin dan jepit. Pindahkan *arm* ke arah berikutnya dan lakukan hal yang serupa dengan langkah 4-6.



Gambar 19. Pengukuran elevasi permukaan tanah dengan *Rod surface elevation table* (RSET) di stasiun monitoring. Alat ukur (*arm*) ditempatkan pada benchmark RSET hanya pada setiap saat pengukuran.

SOP 6: Pengukuran akresi vertikal



Marker horizon (MH) berupa kapur yang ditaburkan untuk dijadikan sebagai penanda titik awal akumulasi permukaan tanah (akresi vertikal tanah). Pengukuran dilakukan secara periodik, bersamaan dengan RSET, sehingga dapat diperoleh nilai *shallow subsidence* dari persamaan akresi vertikal – perubahan elevasi tanah.

Tata cara sampling dan pengukuran:

1. Gunakan suntikan kecil yang telah dimodifikasi untuk pengambilan sampel sedimen di sekitar daerah penebaran kapur;
2. Setelah diperoleh sampel dengan garis kapur yang jelas, ukur ketinggian penambahan sedimen dengan menggunakan penggaris. Lakukan tiga kali pembacaan dengan posisi berbeda pada satu sampel yang sama karena permukaan tanah tidak rata;
3. Ulangi dua kali langkah 1-2 sehingga mendapatkan nilai rata-rata dari tiga pengambilan sampel.

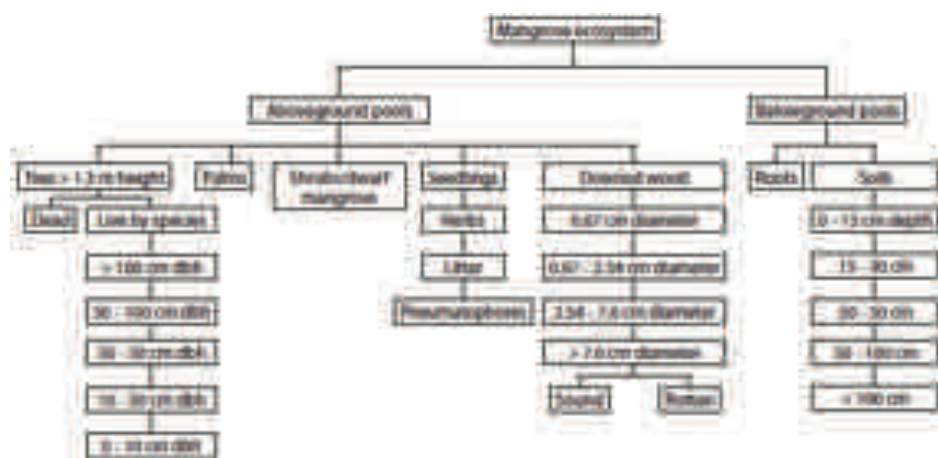
Erosion pins digunakan untuk pengukuran erosi, namun dapat juga digunakan untuk mengukur akresi tanah pada kondisi lingkungan dengan sedimentasi yang tinggi. Tata cara pengukuran:



1. Gunakan tongkat besi atau kayu yang dapat ditanam ke dalam tanah. Tandai tinggi pin 20 cm di atas permukaan tanah;
2. Ukur ketinggian pin pada setiap pengambilan data. Bila tinggi bertambah maka diperkirakan terjadi erosi, dan sebaliknya.

SOP 7: Menghitung stok karbon

Penghitungan stok karbon dapat dilakukan sebagai kegiatan monitoring di plot permanen maupun kajian inventarisasi. Pada plot permanen, data stok yang diperoleh digunakan untuk mengetahui karakteristik ekosistem mangrove sekaligus sebagai data awal untuk mengestimasi penyerapan karbon (*carbon sequestration*) dan faktor emisi (*emission factor*).

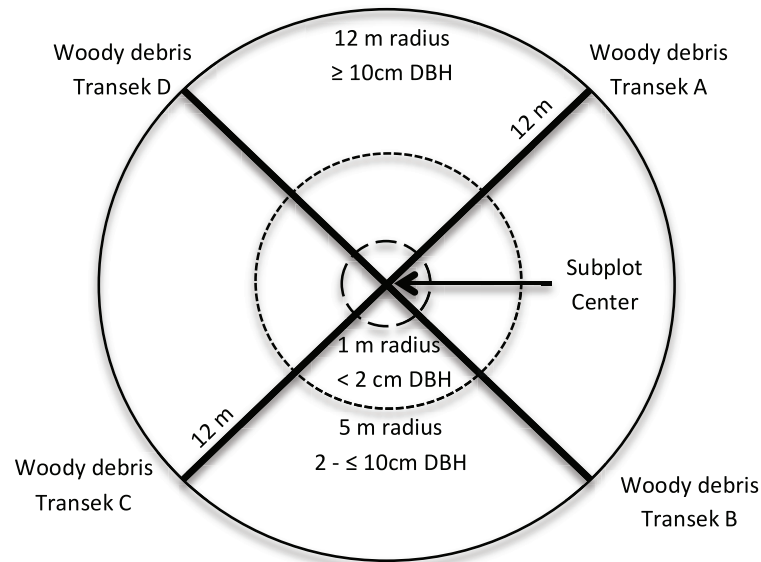


Gambar 20. Komponen yang dihitung sebagai stok karbon mangrove (sumber: Kauffman & Donato, 2012)

Langkah awal adalah menentukan kantong karbon (*carbon pool*) yang akan dihitung. Gambar 20 merupakan skema metode yang digunakan untuk menghitung lima *carbon pool*, yaitu biomasa vegetasi hidup bagian atas (*aboveground biomass*), akar (*belowground biomass*), nekromas (*downed wood/wood debris*), serasah (*litter*), dan tanah (*soil*). Kauffman dan Donato (2012) memasukkan kelima *carbon pool* ke dalam dua kelompok utama *carbon pool*, yaitu *aboveground* dan *belowground*.

Serupa dengan plot untuk kajian struktur hutan mangrove (SOP 4), pengambilan data stok mangrove menggunakan plot yang terbagi atas subplot (*nested plot*). Plot berbentuk lingkaran untuk mendapatkan data dengan akurasi dan presisi yang baik dalam waktu yang terbatas. Untuk stok karbon hutan mangrove, pohon dengan DBH < 5 cm tetap diperhitungkan karena lokasi studi dapat didominasi oleh pohon dengan ukuran kecil (semai

dan pancang), contoh daerah restorasi mangrove (Kauffman dan Cole, 2010).



Gambar 21. Plot lingkaran yang digunakan untuk sampling stok karbon mangrove (modifikasi dari Kauffman & Donato, 2012).

Stok karbon pohon (aboveground dan belowground)

- Pengambilan data dilakukan pada semua pohon dan pancang dengan mencatat nama spesies dan mengukur lingkaran tegakan setinggi DBH dari permukaan tanah atau akar teratas, sesuai jenis dan struktur pohon seperti Gambar 13.
- Semua pohon berukuran DBH ≥ 10 cm dihitung dalam plot. Vegetasi non-pohon umumnya diabaikan dalam perhitungan stok karbon. Pohon berukuran DBH < 10 cm dihitung dalam subplot yang lebih kecil. Tata cara pengukuran dapat mengikuti Gambar 21. Bila lokasi didominasi oleh semai, gunakan ukuran tinggi tegakan semai.
- Hitung biomassa pohon dengan menggunakan persamaan alometrik berdasarkan jenis mangrove (Tabel 2). Untuk pohon yang memiliki > 1 tegakan (*multi-stem*), ukur DBH setiap tegakan, konversikan menjadi biomassa per tegakan dan jumlahkan seluruh nilai biomassa tegakan menjadi total biomassa per pohon.

Tabel 2. Persamaan alometrik yang digunakan untuk menghitung biomassa^{31–35}.

Spesies/Genus	Persamaan alometrik	Referensi
Aboveground		
<i>Avicennia</i>	$W_{top} = 0.1848DBH^{2.3524}$	Dharmawan and Siregar (2008)
<i>Rhizophora</i>	$W_{top} = 0.105DBH^{2.68}$	Clough and Scott (1989)
<i>Sonneratia</i>	$W_{top} = 0.384\rho DBH^{2.101}$ $\rho = 0.078$	Kauffman and Cole (2010)
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	$W_{top} = 0.186DBH^{2.31}$	Clough and Scott (1989)
<i>Ceriops tagal</i>	$W_{top} = 0.251\rho DBH^{2.46}$ $\rho = 0.960$	Komiyama et al. (2005)
<i>Xylocarpus granatum</i>	$W_{top} = 0.0823DBH^{2.59}$	Clough and Scott (1989)
Belowground		
<i>Avicennia</i>	$W_{root} = 0.1682DBH^{1.7939}$	Dharmawan and Siregar (2008)
<i>Rhizophora</i>	$W_{root} = 0.261DBH^{1.86}$	Comley and McGuinness (2005)
<i>Sonneratia</i>	$W_{root} = 0.199\rho^{0.899}DBH^{2.22}$ $\rho = 0.078$	Komiyama et al. (2005)
<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	$W_{root} = 0.199\rho^{0.899}DBH^{2.22}$ $\rho = 0.741$	Komiyama et al. (2005)
<i>Ceriops tagal</i>	$W_{root} = 0.199\rho^{0.899}DBH^{2.22}$ $\rho = 0.960$	Komiyama et al. (2005)
<i>Xylocarpus granatum</i>	$W_{root} = 0.199\rho^{0.899}DBH^{2.22}$ $\rho = 0.700$	Komiyama et al. (2005)

- Stok karbon dari tegakan mangrove dihitung dengan mengalikan biomassa per pohon dan faktor konversi karbon. Faktor konversi dapat menggunakan nilai baku (*default value*) dari Kauffman dan Donato (2012), yaitu 0.46 – 0.5. Total stok karbon pohon dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Stok karbon aboveground per pohon (kg C)} = \text{biomassa (kg)} \times \text{faktor konversi (0.46 – 0.5)}$$

$$\text{Stok karbon aboveground pohon per plot (kg C/m}^2\text{)} = \frac{\sum \text{Cadangan karbon pohon}}{\text{area plot (m}^2\text{)}}$$

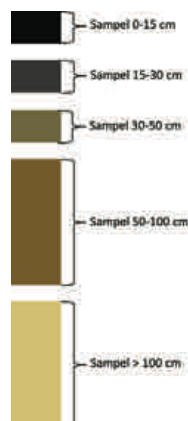
- Perhitungan stok karbon *belowground* menggunakan persamaan alometrik sesuai dengan data DBH yang diperoleh untuk biomassa *aboveground* (Tabel 2). Nilai tersebut dikonversi menjadi stok karbon dengan faktor konversi 0.39.

Stok karbon *belowground* per pohon (kg C) =
biomassa (kg) x faktor konversi (0.39)

Stok karbon *belowground* pohon per plot (kg C/m²) =
$$\frac{\sum \text{Cadangan karbon pohon}}{\text{area plot (m}^2\text{)}}$$

Stok karbon tanah

- Pengambilan sampel tanah dilakukan dengan menggunakan coring *open face auger* (panjang 150 cm) untuk mendapatkan sampel dengan kedalaman minimal 100 cm. Ketika sampling, dorong dan putar *auger* secara perlahan untuk menghindari pemadatan sampel (*compaction*).
- Iris sampel menjadi separuh permukaan dan potong menjadi lima bagian dengan interval: 0-15 cm, 15-30 cm, 30-50 cm, 50-100 cm dan >100 cm. Pada setiap interval, ambil 5 cm sampel kondisi baik dan simpan dalam wadah (aluminium foil dan plastik klip). Catat interval dan total kedalaman sampel yang diambil.



- Sampel tanah dikirim ke laboratorium untuk mendapatkan nilai berat kering (suhu oven 60 °C) dan karbon organik (C_{org}). Apabila sampel tidak

langsung dibawa ke laboratorium, awetkan sampel dengan menyimpan pada suhu 4 °C untuk mencegah rusaknya unsur kimia dan biologi tanah.

- Setelah hasil lab diperoleh, stok karbon dapat dihitung:

Densitas karbon tanah (g/cm³) =

$$bulk\ density \times \left(\frac{\%C_{org}}{100} \right)$$

Stok karbon per interval (g/cm³) =

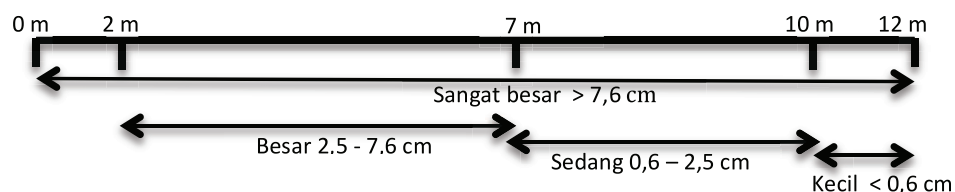
Densitas karbon tanah x kedalaman interval

Stok karbon per coring sampel =

Stok karbon interval₁ + Stok karbon interval₂ +

Nekromas

- Nekromas merupakan potongan kayu atau batang pohon yang jatuh di permukaan tanah. Pengambilan data mengikuti metode *line intersect*, yaitu menghitung setiap potongan yang jatuh pada garis ukur sesuai dengan kelasnya.
- Rentangkan tali dari pusat plot (0 m) hingga 12 m dan bagi menjadi empat kelompok pengukuran potongan kayu/batang sesuai bagiannya. Ukur dan hitung semua potongan berdiameter >7.6 m bila ditemukan jatuh pada garis ukur. Untuk ukuran lainnya, potongan hanya dihitung bila masuk dalam bagiannya (2-7 m untuk potongan besar, 7-10 m untuk potongan sedang, dan 10-12 m untuk potongan kecil).



- Selain menghitung jumlah potongan per kelompok, catat kondisi kayu per potongan. Bila memungkinkan ambil sampel potongan kayu untuk dianalisa *wood density*. Ulangi pengukuran pada tiga arah mata angin lainnya (Transek A - D, Gambar 21).

Serasah

Perhitungan serasah jarang dilakukan karena kontribusi stok karbon dari *pool* ini tidak signifikan. Pengambilan sampel serasah (daun dan bunga) dilakukan dengan menggunakan transek berukuran 50 x 50 cm yang diletakan di permukaan tanah. Pada plot permanen, sampling dilakukan secara periodik dan menggunakan jaring serasah yang digantungkan pada pohon agar tidak terganggu oleh pasang surut dan aktivitas manusia.



(a)



(b)

Gambar 22. Jaring serasah (a) dan kuadran (b) yang digunakan untuk perhitungan serasah.

