



**Estimasi Stok Karbon Mangrove
Dengan Memanfaatkan Pemodelan Citra Satelit
Penginderaan Jauh Dalam Menekan Emisi CO₂**

DISERTASI

**UNTUK MEMENUHI PERSYARATAN
MEMPEROLEH GELAR DOKTOR**



Oleh :

FIRMAN FARID MUHSONI

NIM: 157080100111006

**PROGRAM STUDI ILMU PERIKANAN DAN KELAUTAN
MINAT PENGELOLAAN PESISIR DAN LAUT**

**PROGRAM DOKTOR PASCASARJANA
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018**



Estimasi Stok Karbon Mangrove Dengan Memanfaatkan Pemodelan Citra Satelit Penginderaan Jauh Dalam Menekan Emisi CO₂

DISERTASI

UNTUK MEMENUHI PERSYARATAN MEMPEROLEH GELAR DOKTOR



Oleh :

FIRMAN FARID MUHSONI
NIM: 157080100111006

PROGRAM STUDI ILMU PERIKANAN DAN KELAUTAN
MINAT PENGELOLAAN PESISIR DAN LAUT

PROGRAM DOKTOR PASCASARJANA
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2018



**Estimasi Stok Karbon Mangrove Dengan Memanfaatkan
Pemodelan Citra Satelit Penginderaan Jauh Dalam
Menekan Emisi CO₂**

DISERTASI

Oleh :
: **Firman Farid Muhsoni**
: **157080100111006**
: **Ilmu Perikanan dan Kelautan**
: **Pengelolaan Pesisir dan Laut**

Nama Mahasiswa
: **NIM**
: **Program Studi**
: **Minat**

Menyetujui
KOMISI PEMBIMBING

Dr. Ir. Dewa Gede Raka, W. MSc.
Promotor

Dr. Ir. Mohammad Mahmudi, MS
Ko-Promotor

Dr. Eng. Abu Bakar Sambah, S.Pi, MT
Ko-Promotor

Mengetahui
Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan
Universitas Brawijaya

Prof. Dr. Ir. Happy Nursyam, MS
NIP. **196003221986011001**



IDENTITAS TIM PENGUJI

JUDUL DISERTASI : Estimasi Stok Karbon Mangrove Dengan
Memanfaatkan Pemodelan Citra Satelit Penginderaan

Jauh Dalam Menekan Emisi CO₂

Nama Mahasiswa : Firman Farid Muhsoni

N I M : 157080100111006

Program Studi : Ilmu Perikanan dan Kelautan

Minat : Pengelolaan Pesisir dan Laut

DOSEN PROMOTOR:

Promotor : Dr. Ir. Dewa Gede Raka, W, MSc.

Ko-Promotor I : Dr. Ir. Mohammad Mahmudi, MS

Ko-Promotor II : Dr. Eng. Abu Bakar Sambah, S.Pi, MT

DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr. Mohammad Amin, S.Pd, M.Si

Dosen Penguji 2 : Prof. Dr. Ir. Kurniatun Hairiah

Dosen Penguji 3 : Ir. Aida Sartimbul, MSc. Ph.D.

Dosen Penguji 4 : Dr. Makhfud Efendy, S.Pi, M.Si.

Tanggal Ujian : 11 Desember 2018



PERNYATAAN ORISINALITAS PENELITIAN DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah Disertasi ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiasi, saya bersedia Disertasi (DOKTOR) dibatalkan, serta diproses dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Desember 2018
Penulis

Firman Farid Muhsoni
NIM. 157080100111006



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI





RIWAYAT HIDUP



Firman Farid Muhsoni, lahir di Malang (Jawa Timur) 26 Juni 1977, anak kelima dari lima bersaudara, dari pasangan suami-istri Slamet Hasan Boesri dengan Djumaati. Menamatkan Sekolah Dasar pada tahun 1989 di SDN Lowokwaru 2 Kecamatan Lowokwaru Kabupaten Malang, pada tahun 1992 tamat dari SMPN 3 Malang, dan pada tahun 1995 tamat dari SMAN 2 Malang. Kemudian pada tahun 1997, melanjutkan pendidikan di Fakultas Perikanan Universitas Brawijaya pada Program Studi Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan dan tamat pada tahun 2002. Pada tahun 2006 melanjutkan pendidikan magister di Program Studi Penginderaan Jauh di Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada, dan tamat pada tahun 2008. Pada tahun 2015 diterima sebagai mahasiswa program doktor (S3) di Pascasarjana Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya Malang dengan Program Studi Ilmu Perikanan dan Kelautan dengan minat Pengelolaan Pesisir dan Laut.

Sejak tahun 2003 sampai sekarang, bekerja sebagai staf pengajar di Universitas Trunojoyo Madura Fakultas Pertanian, Program Studi Ilmu Kelautan dan pada tahun 2016 di pindahkan ke Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan. Pernah menjabat sebagai Pembantu Dekan III di Fakultas Pertanian pada tahun 2009-2013, Kepala Pusat Penelitian Pesisir dan Lingkungan di LPPM UTM tahun 2013-2015.

Malang, Desember 2018

Penulis,

Firman Farid Muhsoni

NIM.157080100111006



UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur dipanjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga disertasi dengan judul: **“Estimasi Stok Karbon Mangrove Dengan Memanfaatkan Pemodelan Citra Satelit Penginderaan Jauh Dalam Menekan Emisi CO₂”** ini dapat terselesaikan dengan baik dan lancar.

Penelitian dan penulisan disertasi ini dimaksudkan untuk memenuhi sebagian dari persyaratan guna memperoleh gelar Doktor, pada Program Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan dan merupakan kesempatan berharga sekali untuk menerapkan beberapa teori yang diperoleh selama menempuh pendidikan dalam situasi dunia nyata. Tanpa kesempatan, bimbingan, masukan, serta dukungan semangat dari berbagai pihak, tentunya disertasi ini tidak akan terwujud sebagaimana bentuknya saat ini.

Sehubungan dengan selesainya penulisan disertasi ini, penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bantuan, baik moril maupun materiil, yaitu:

- 1) Prof. Dr. Ir. Nuhfil Hanani AR., MS., selaku Rektor Universitas Brawijaya;
- 2) Prof. Dr. Ir. Happy Nursyam, MS, selaku Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya;
- 3) Dr. Ir. Anik Martinah Hariati, M.Sc, selaku Ketua Program Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan Universitas Brawijaya;
- 4) Rektor Universitas Trunojoyo Madura yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melanjutkan studi psds Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya
- 5) Dr. Ir. Dewa Gede Raka, W. MSc., selaku Promotor yang telah memberikan arahan dan bimbingan untuk perbaikan disertasi ini;
- 6) Dr. Ir. Mohammad Mahmudi, MS dan Dr. Eng. Abu Bakar Sambah, S.Pi, MT, selaku Ko- Promotor yang telah memberikan arahan dan bimbingan untuk perbaikan disertasi ini;
- 7) Para Tim Penguji Disertasi: Prof. Dr. Mohammad Amin, S.Pd, M.Si, Prof. Dr. Ir. Hairiah Kurniatun, Ir. Aida Sartimbul, MSc, Ph.D yang telah memberikan saran dan masukan untuk perbaikan disertasi ini.
- 8) Segenap staf pengajar pada Program Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan Universitas Brawijaya;
- 9) Para Pegawai dan Staf Administrasi pada Program Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan Universitas Brawijaya;
- 10) Kementrian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah memberikan bantuan Beasiswa Program Pendidikan Dalam Negeri (BPPDN);
- 11) Almarhum Bpk. Slamet Hasan Boesri dan Ibu Djumaati selaku orang tua kami; Bpk Saiful Rizal dan Ibu Nanik Kusuma Wardani selaku mertua kami; Fitra Kusuma Santi, S.Pi, Muhamad Ammar Abdul Hakim dan Nida



Shafa Huwaida selaku Istri dan anak-anak tercinta yang telah memberikan semangat, kesabaran, dan doa tak henti-hentinya;

12) Saudara, sahabat, handai taulan dan segenap pihak yang telah memberikan dorongan, motivasi dan bantuan berupa material maupun nonmaterial sehingga penulis dapat menyelesaikan studi.

13) Rekan-rekan mahasiswa Program Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan Universitas Brawijaya;

Kepada pihak-pihak lainnya yang tidak mungkin disebutkan satu per-satu, juga penulis sampaikan penghargaan dan rasa terima kasih yang tidak terhingga, karena dengan bantuan Bapak dan Ibu semuanya maka disertasi ini dapat diselesaikan penulisannya dengan baik.

Penulis menyadari bahwa hasil disertasi ini memiliki kekurangan dan keterbatasan, namun penulis berharap semoga bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan Rahmat dan Karunia-Nya kepada kita semua dalam melaksanakan pengabdian bagi kejayaan negara dan bangsa Indonesia yang kita cintai. Amin.

Malang, Desember 2018

Penulis

Firman Farid Muhsoni

NIM. 157080100111006



DAFTAR ISTILAH

Stok karbon atau cadangan karbon: kandungan karbon tersimpan baik pada permukaan tanah sebagai biomasa tanaman, sisa tanaman yang sudah mati (nekromasa), maupun dalam tanah sebagai bahan organik tanah.

Emisi : zat, energi atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk atau dimasukkannya ke dalam udara yang mempunyai potensi sebagai unsur pencemar.

Pemanasan global: kenaikan suhu permukaan bumi yang disebabkan oleh peningkatan keluaran (emisi) gas rumah kaca, seperti; karbondioksida, metana, dinitro oksida, hidrofluorokarbon, perfluorokarbon, dan sulfur heksafluorida di atmosfer.

Iklim mikro: merupakan iklim dalam satu wilayah spesifik dalam satu area yang lebih luas.

Produksi primer: produksi senyawa organik dari karbon dioksida di udara atau air yang didominasi oleh proses fotosintesis.

Bioregion: kawasan atau wilayah geografis yang relatif luas dan memiliki bentang alam serta kekayaan jenis keanekaragaman hayati yang tinggi dimana proses lingkungan alaminya mempengaruhi fungsi-fungsi ekosistem didalamnya.

Penginderaan jauh: pengukuran atau akuisisi data dari sebuah objek atau fenomena oleh sebuah alat yang tidak secara fisik melakukan kontak dengan objek tersebut atau pengukuran atau akuisisi data dari sebuah objek atau fenomena oleh sebuah alat dari jarak jauh (misalnya dari pesawat, pesawat luar angkasa, satelit, kapal atau alat lain). Contoh dari penginderaan jauh antara lain satelit pengamatan bumi, satelit cuaca dan wahana luar angkasa yang memantau planet dari orbit.

Indeks vegetasi: analisis yang digunakan oleh para agronom dalam melakukan penelitian tentang biomassa dan vegetatif dengan menganalisa pada nilai kecerahan digital.

vivipar: kondisi dimana embryo pertama kali tumbuh, memecah kulit biji dan keluar dari buah pada saat masih melekat pada tumbuhan induk.

Environmental Protection Agency (Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat): sebuah lembaga pemerintah federal Amerika Serikat yang bertugas melindungi kesehatan manusia dan lingkungan dengan merumuskan dan menerapkan peraturan berdasarkan undang-undang yang disahkan oleh Kongres.

Biodegradable: memiliki kemampuan untuk terurai, dengan aman dan relatif cepat, secara biologis, ke dalam bahan-bahan mentah alam dan membaur kembali ke lingkungan.

Perubahan iklim: perubahan jangka panjang dalam distribusi pola cuaca secara statistik sepanjang periode waktu mulai dasawarsa hingga jutaan tahun.



Siklus biogeokimia: daur ulang air dan komponen-komponen kimia (unsur kimia) yang melibatkan peran serta dari makhluk hidup termasuk manusia dan bebatuan/geofisik.

Gas rumah kaca: gas-gas yang ada di atmosfer yang menyebabkan efek rumah kaca.

Karbon organik: golongan besar senyawa kimia yang molekulnya mengandung karbon, kecuali karbida, karbonat, dan oksida karbon.

Dekomposisi: jenis reaksi kimia dimana senyawa dipecah menjadi komponen yang lebih sederhana.

Silvikultur: praktik pengendalian proses pertumbuhan (penanaman), pertumbuhan, komposisi, kesehatan, dan kualitas suatu hutan demi mencapai aspek-aspek ekologi dan ekonomi yang diharapkan.

Halophytes atau Halofit: jenis tanaman yang tumbuh dan hidup dengan baik di pantai maupun di laut, tumbuhan ini tergolong tumbuhan tingkat lebih tinggi, karena tumbuhan ini tahan terhadap kadar garam yang tinggi di dasar air.

Halophytes obligat: tumbuhan yang hanya dapat hidup pada keadaan payau

Gaya drag: adalah gaya hambat yang dikarenakan adanya gesekan dan tahanan

Sedimen/tanah sedimen: material mineral dan material organik yang terakumulasi di pantai atau dasar laut yang terbawa sungai atau arus laut.

Akresi sedimen: perubahan garis pantai menuju laut lepas karena adanya proses sedimentasi dari daratan atau sungai menuju arah laut.

Sirkulasi baroklinik: situasi dimana permukaan dengan tekanan yang sama disebut permukaan isobarik atau sejajar dengan permukaan laut.

Flokulasi partikel: proses pembentukan flok pada pengadukan lambat untuk meningkatkan saling hubung antar partikel yang goyah sehingga meningkatkan penyatuannya (aglomerasi).

Turbulensi gelombang: gerakan (air) tidak beraturan atau berputar tidak beraturan akibat perbedaan tekanan atau temperatur.

Disagregasi: keadaan tidak bersatu padu

invertebrata : mencakup semua hewan kecuali hewan vertebrata (pisces, reptil, amfibia, aves, dan mamalia). Contoh invertebrata adalah serangga, ubur-ubur, hydra, cumi-cumi, dan cacing.

Pneumatophores: nama lain untuk menyebut tipe akar mangrove yaitu akar nafas.

Polifenol: kelompok zat kimia yang ditemukan pada tumbuhan.



hyperspectral atau **hyperspectral imaging**: seperti pencitraan spektral lainnya, mengumpulkan dan memproses informasi dari seluruh spektrum elektromagnetik.

Gelombang mikro (microwave): gelombang elektromagnetik dengan frekuensi super tinggi (Super High Frequency, SHF), yaitu di atas 3 GHz (3×10^9 Hz).

Spasial: data yang memiliki referensi ruang kebumihian (*georeference*) di mana berbagai data atribut terletak dalam berbagai unit *spasial*. Ciri spasial adalah ciri yang terkait dengan ruang yang meliputi tekstur, bentuk, ukuran, bayangan, pola, situs, dan asosiasi.

Spektral: hasil interaksi antara energi elektromagnetik (EM) dengan suatu objek. Ciri spektral adalah ciri yang dihasilkan oleh interaksi antara tenaga elektromagnetik dan objek. Ciri spektral dinyatakan dengan rona atau warna.

Temporal: kemampuan suatu sistem untuk merekam ulang daerah yang sama, dalam satuan jam atau hari.

Band: saluran pada citra dengan panjang gelombang tertentu. Contoh band biru panjang gelombang 0.45–0.51 μm , band hijau 0.53–0.59 μm , band merah 0.64–0.67 μm .

Reflektivitas: kemampuan suatu bahan dalam memantulkan gelombang elektromagnetik yang terpapar ke permukaannya. Dalam perhitungannya sering digunakan istilah koefisien reflektansi.

Xantofil: kelompok yang merupakan turunan karotema yang beroksigen dengan rumus $\text{C}_4\text{O}_4\text{H}_6\text{O}_2$ yang berfungsi sebagai pigmen pembantu dalam proses fotosintesis, misalnya Fukoxantin dan Peridinin.

Fluoresensi: terpancarnya sinar oleh suatu zat yang telah menyerap sinar atau radiasi elektromagnet lain.

Algoritma: urutan atau langkah-langkah untuk penghitungan atau untuk menyelesaikan suatu masalah yang ditulis secara berurutan.

GIS atau **Sistem Informasi Geografis** (bahasa Inggris: *Geographic Information System* disingkat *GIS*): sistem informasi khusus yang mengelola data yang memiliki informasi spasial (bereferensi keruangan).

Bulk density atau **kerapatan lindak**: bobot isi menunjukkan perbandingan antara berat tanah kering dengan volume tanah termasuk volume pori-pori tanah.

Koreksi radiometrik: untuk memperbaiki nilai piksel supaya sesuai dengan yang seharusnya, biasanya mempertimbangkan faktor gangguan atmosfer sebagai sumber kesalahan utama.

Mangrove muara: mangrove yang terletak di daerah muara sungai dan sedimentasi banyak berasal dari sungai

Mangrove laut: mangrove yang terletak di daerah tepi laut dan relatif jauh dari muara sungai dengan jarak > 2 km dari sungai



Mangrove campuran: mangrove total atau gabungan dari semua mangrove baik muara atau laut.

Koreksi radiometrik: memperbaiki nilai piksel supaya sesuai dengan yang seharusnya, mempertimbangkan faktor gangguan atmosfer sebagai sumber kesalahan utama.

Koreksi geometri: merupakan proses menyesuaikan koordinat pixel pada citra dengan koordinat bumi dalam bidang datar.

Otsu Threshold : metode untuk segmentasi citra digital dengan menggunakan nilai ambang secara otomatis yang diperkenalkan oleh Nobuyuki Otsu.

At-sensor radiance: koreksi radiometri dengan kalibrasi sensor yang tercatat oleh sensor, ditunjukkan dengan kemampuan mendeteksi radiansi spectral minimum maupun maksimum dari objek.

At-sensor reflectance: koreksi radiometri kalibrasi sensor dari pantulan yang diterima sensor.

Masking: memotong citra sesuai dengan objek yang dibutuhkan.



RINGKASAN

Nama Mahasiswa : Firman Farid Muhsoni, NIM : 157080100111006
 Program Doktor Ilmu Perikanan dan Kelautan, Program Pascasarjana
 Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya Malang,
 Oktober 2018, "**Estimasi Stok Karbon Mangrove Dengan Memanfaatkan
 Pemodelan Citra Satelit Penginderaan Jauh Dalam Menekan Emisi CO₂**",
 Komisi Pembimbing/Promotor : Dr. Ir. Dewa Gede Raka, W. MSc., Ko-
 Promotor I : Dr. Ir. Mohammad Mahmudi, MS, Ko-Promotor II : Dr. Eng. Abu
 Bakar Sambah, S.Pi, MT.

Mangrove adalah salah satu ekosistem hutan yang mampu mengurangi efek rumah kaca. Kemampuan ekosistem mangrove dalam menyimpan karbon merupakan yang tertinggi dibandingkan hutan tropis, hutan subtropis dan hutan boreal. Kemampuan mangrove dalam mengurangi emisi CO₂ sangat potensial. Metode estimasi stok karbon mangrove dengan citra satelit yang berkembang saat ini hanya memperhitungkan biomassa vegetasi saja tanpa memperhitungkan stok karbon tanah. Tujuan Penelitian ini adalah: mendapatkan data perbandingan estimasi stok karbon mangrove pada jenis mangrove muara dan mangrove laut; Mendapatkan model perhitungan stok karbon mangrove dengan akurasi yang lebih baik menggunakan citra satelit Sentinel-2 dan LDCM; Mendapatkan data perubahan stok karbon mangrove di Pulau Madura tahun 1994, 2002 dan 2017 dan konversi karbon ke CO₂.

Data citra yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah : citra Sentinel-2 dan citra Landsat (Landsat 5, Landsat 7 dan LDCM). Tahapan penelitian ada 4 tahapan. Tahap 1 analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat menggunakan analisis indeks vegetasi dan masking hasil klasifikasi wilayah mangrove. Tahap ini terdiri dari : a) Praprosesing koreksi radiometrik citra satelit dengan menggunakan metode *at-sensor reflectance*; b) Transformasi indeks vegetasi dengan 24 jenis indeks vegetasi (BR, GNVI, GR, SAVI, MSAVI, NDRE, NDVI, NDVI2, NDWI, NNIP, PSRI, RR, RVI, SVI, VIRE, VIRRE, WVVI, MTV1, MTV2, RDVI, VARI, VIGeen, MSR, TVI); c) Pemisahan wilayah mangrove hasil klasifikasi metode *Otsu Threshold*; d) Penentuan lokasi plot sampling. Tahap 2 pengukuran data lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove. Estimasi biomassa dan karbon mangrove pada permukaan dan bawah permukaan mangrove menggunakan metode alometrik. Tahap 3 Pemodelan *hybrid* untuk estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat. Pemodelan stok karbon mangrove dengan pendekatan statistik. Uji akurasi model dengan Root Mean Square Error (RMSE). Tahap 4 penerapan pemodelan untuk evaluasi perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017 di Pulau Madura.

Jenis mangrove yang ditemukan di lokasi penelitian ada 17 jenis untuk mangrove sejati dan 4 jenis untuk mangrove ikutan. Biomassa mangrove muara lebih kecil dibandingkan mangrove laut (selisih 60,3 ton ha⁻¹). Perbandingan biomassa antara mangrove muara dengan mangrove laut mencapai 1:1,8. Rata-rata kedalaman tanah/sedimen mangrove muara sebesar 128,3 cm, untuk mangrove laut sebesar 77,55 cm (selisih 50,77 cm). Kerapatan lindak mangrove muara sebesar 1,11 g cm⁻³ dan mangrove laut sebesar 0,95 g cm⁻³ (selisih 0,16 g cm⁻³). Perbandingan stok karbon tanah



antara mangrove muara dengan laut mencapai $336,1 \text{ ton ha}^{-1}$: $184,9 \text{ ton ha}^{-1}$ atau 1,8:1. Perbandingan stok karbon biomassa (pohon, akar dan tanaman bawah) dengan karbon tanah untuk jenis mangrove campuran sebesar 1:4,8. Jenis mangrove muara perbandingannya sebesar 1:9,1 dan jenis mangrove laut sebesar 1:2,8.

Pemodelan citra Sentinel-2 untuk estimasi karbon mangrove adalah (1) model 1 dengan penggabungan antara estimasi karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri dan untuk estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel (indeks vegetasi NDRE atau WVI, kedalaman tanah/sedimen, kerapatan lindak tanah, % C kedalaman 0-15 cm, % C kedalaman 15-50 cm dan % C kedalaman > 50 cm). Hasil uji RMSE sebesar $0,4778 \text{ ton } 100 \text{ m}^2$ dan % RMSE sebesar 16,12%. (2) Model 2 penggabungan estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri dan untuk estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 3 variabel (indeks vegetasi VIRRE, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah). Hasil uji RMSE sebesar $0,5639 \text{ ton } 100 \text{ m}^2$ dan % RMSE 19,03%. (3) Model 3 penggabungan estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri dan untuk estimasi tanah menggunakan 2 variabel (indeks vegetasi yang sesuai NDRE dan kedalaman sedimen). Hasil uji RMSE sebesar $0,7295 \text{ ton } 100 \text{ m}^2$ dan % RMSE 24,63%. (4) Model 4 penggabungan antara persamaan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri menggunakan regresi power/geometri untuk estimasi karbon biomassa dan regresi berganda 3 variabel (indeks vegetasi VIRRE, nilai rata-rata kedalaman sedimen $100,63 \text{ cm}$, nilai kerapatan lindak tanah $1,02 \text{ g cm}^{-3}$) untuk estimasi karbon tanah. Hasil uji RMSE untuk model ini $1,0043 \text{ ton } 100 \text{ m}^2$ dan % RMSE 33,89%.

Pemodelan citra LDCM untuk estimasi stok karbon adalah (1) model 1 penggabungan estimasi karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dan untuk estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel (indeks vegetasi RDVI kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah, %C kedalaman 0-15 cm, %C kedalaman 15-50 cm dan %C kedalaman > 50 cm). Hasil uji RMSE sebesar $2,53079 \text{ ton } 900 \text{ m}^2$ dan % RMSE sebesar 9,58%. (2) Model 2 estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dan untuk estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 3 variabel (indeks vegetasi MSAVI, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah). Hasil uji RMSE sebesar $6,87089 \text{ ton } 900 \text{ m}^2$ dan % RMSE 26,0 %. (3) Model 3 estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dan untuk estimasi tanah menggunakan 2 variabel (indeks vegetasi yang sesuai MSAVI dan kedalaman sedimen). Hasil uji RMSE sebesar $6,65033 \text{ ton } 900 \text{ m}^2$ dan % RMSE 25,17 %. (4) Model 4 penggabungan estimasi karbon biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dan untuk estimasi tanah menggunakan regresi berganda 3 variabel (indeks vegetasi MSAVI, nilai rata-rata kedalaman sedimen $100,63 \text{ cm}$, nilai kerapatan lindak tanah $1,02 \text{ g cm}^{-3}$). Hasil uji RMSE untuk model ini $9,03122 \text{ ton } 900 \text{ m}^2$ dan % RMSE 34,18%.

Estimasi stok karbon mangrove Pulau Madura tahun 1994 sebesar 436.552 ton , tahun 2002 sebesar 458.985 ton , dan tahun 2017 sebesar 955.781 ton . Rata-rata pertambahan stok karbon mangrove di Pulau Madura dari tahun 1994-2002 sebesar $2.804,2 \text{ ton tahun}^{-1}$, tahun 2002-2017 sebesar $33.119,7 \text{ ton tahun}^{-1}$. Hasil estimasi kandungan CO_2e mangrove di Pulau Madura tahun 1994 sebesar $1.602.120,2 \text{ ton}$, tahun 2002 sebesar $1.684.476,2$



ton, dan tahun 2017 sebesar 3.504.676,2 ton. Mangrove di Pulau Madura selama periode tahun 1994-2002 dapat menekan emisi CO₂ sebesar 82.356,0 ton atau 10.294,5 ton tahun⁻¹ dan pada periode 2002-2017 dapat menekan emisi CO₂ sebesar 1.820.200,0 ton atau 121.346,7 ton tahun⁻¹.

Hasil penelitian ini disimpulkan perbandingan stok karbon biomassa dengan karbon tanah mencapai 1:4,8 untuk mangrove campuran, untuk mangrove muara sebesar 1:9,1, dan mangrove laut mencapai 1:2,8. Pemodelan estimasi stok karbon mangrove terbaik adalah model 1. Citra Sentinel-2 dengan menggabungkan antara estimasi stok karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri dan estimasi stok karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel dengan indeks vegetasi NDRE atau WVI. Citra LDCM dengan menggabungkan estimasi stok karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dan estimasi stok karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel dengan indeks vegetasi RDVI. Model yang tidak memerlukan data lapang adalah model 4. Citra Sentinel 2 dengan menggabungkan antara persamaan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri menggunakan regresi power/geometri untuk estimasi stok karbon biomassa dan regresi berganda 3 variabel dengan indeks vegetasi VIRRE untuk estimasi stok karbon tanah. Citra LDCM dengan menggabungkan estimasi stok karbon biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dan untuk estimasi stok karbon tanah menggunakan regresi berganda 2 variabel dengan indeks vegetasi MSAVI. Mangrove di Pulau Madura selama periode tahun 1994-2002 dapat menekan emisi CO₂ sebesar 82.356,0 ton atau 10.294,5 ton tahun⁻¹ dan pada periode 2002-2017 dapat menekan emisi CO₂ sebesar 1.820.200,0 ton atau 121.346,7 ton tahun⁻¹.

Kata Kunci : Karbon Mangrove, Metode Hybrid, Sentinel-2, Landsat.



SUMMARY

Name of Student: Firman Farid Muhsoni, NIM: 157080100111006 Doctoral Program of Fisheries and Marine Sciences, Postgraduate Program Faculty of Fisheries and Marine Science Universitas Brawijaya Malang, July 2018, "Estimation of Mangrove Carbon Stock by Utilizing Satellite Imagery Remote Sensing Model In Pressing CO₂ Emission" Advisor: Dr. Ir Dewa Gede Raka, W. MSc., Co-Promoter I: Dr. Ir. Mohammad Mahmudi, MS, Co-Promoter II: Dr. Eng Abu Bakar Sambah, S.Pi, MT.

Mangrove is one of the forest ecosystems that can reduce the greenhouse effect. The ability of mangrove ecosystems in storing carbon is the highest compared to tropical forests, subtropical forests and boreal forests. The ability of mangrove in reducing CO₂ emission is very potent.

The objectives of this research are: to get comparison data of mangrove carbon stock estimation on estuary mangrove and oceanic mangrove species; Obtain model calculation of mangrove carbon stock with better accuracy using Sentinel-2 and LDCM satellite images; Obtain data on mangrove carbon stock changes in Madura Island in 1994, 2002 and 2017 and carbon conversion to CO₂. The estimation method of mangrove carbon stocks with developing satellite imagery currently only takes into account vegetation biomass without taking into account the soil carbon stock. Image data used in this research are Sentinel-2 image and Landsat image 5, Landsat 7 and LDCM. Research stage there are 4 stages. Phase 1 of Sentinel-2 and Landsat satellite image analysis used vegetation index analysis and masking result of mangrove area classification. This stage consists of a) Preprocessing radiometric correction of satellite images using the at-sensor reflectance method; b) Transformation of vegetation index with 24 types of vegetation index (BR, GNVI, GR, SAVI, MSAVI, NDRE, NDVI, NDVI2, NDWI, NNIP, PSRI, RR, RVI, SVI, VIRE, VIRRE, WVI, MTV1, MTV2, RDVI, VARI, VIGeen, MSR, TVI); c) Separation of mangrove area from Otsu Threshold method classification; d) Determination of plot sampling location. Phase 2 field data measurement for calculation of biomass and mangrove carbon. Estimation of biomass and mangrove carbon on the surface and under mangrove surface using the allometric method. Stage 3 Hybrid modeling for carbon estimation using Sentinel-2 and Landsat images. Modeling of mangrove carbon stock with the statistical approach. Test the model accuracy with Root Mean Square Error (RMSE). Stage 4 application of modeling for evaluation of changes in mangrove carbon stock and conversion to CO₂ temporally in 1994, 2002, 2017 on Madura Island.

The mangrove species found in the study sites are 17 species for true mangrove and 4 species for mangrove followings. Mangrove biomass is smaller than oceanic mangrove (60.3 tons ha⁻¹ difference). The comparison of biomass between estuary mangroves with oceanic mangrove reaches 1: 1.8. The average depth of mangrove estuary sediment is 128.3 cm, for oceanic mangrove of 77.55 cm (difference of 50.77 cm). The density of mangrove estuaries was 1.11 g cm⁻³ and the oceanic mangrove was 0.95 g cm⁻³ (difference of 0.16 g cm⁻³). Comparison of soil carbon stock between estuary mangrove with sea reaches 336,1 ton ha⁻¹: 184,9 ton ha⁻¹ or 1,8: 1.



Comparison of biomass carbon stock (trees, roots and lower plants) with soil carbon for mixed mangrove species of 1: 4,8. Mangrove species comparison of 1: 9,1 and oceanic mangrove species of 1: 2,8.

The Sentinel-2 image modeling for mangrove carbon estimation is (1) model 1 by combining biomass carbon estimates using the NNIP vegetation regression equation of power/geometry and for soil carbon estimation using multiple regression of 6 variables (NDRE or WVVI vegetation index, sediment depth, soil density, % C depth 0-15 cm, % C depth 15-50 cm and % C depth > 50 cm). RMSE test results of 0.4778 ton 100m⁻² and RMSE% of 16,12%. (2) Model 2 incorporating biomass estimation using NNIP regression index of power/geometry and for soil carbon estimation using multiple variable regression (VIRRE vegetation index, sediment depth, soil density). RMSE test result is 0,5639 ton 100m⁻² and RMSE 19,03%. (3) Model 3 incorporation of biomass estimation using NNIP regression index of power/geometry and for soil estimation using 2 variables (NDRE corresponding vegetation index and sediment depth). RMSE test result is 0,7295 ton 100m⁻² and RMSE 24,63%. (4) Model 4 incorporation of NNIP vegetation regression equation of power regulation/geometry using power regression/geometry for biomass carbon estimation and multiple variable regression (VIRRE vegetation index, average sediment depth value 100.63 cm, soil density value 1,02 g cm⁻³) for estimation of soil carbon. The RMSE test results for this model are 1,0043 ton 100m⁻² and RMSE% 33,89%.

LDCM image modeling for carbon stock estimation is (1) model 1 incorporation of carbon biomass estimation using equations of vegetation index VARI regression of power/geometry and for ground carbon estimation using multiple regression of vegetation (RDVI vegetation index of sediment depth, soil density, % C depth 0-15 cm, % C depth of 15-50 cm and % C depth > 50 cm). RMSE test result is 2,53079 ton 900m⁻² and RMSE 9,58%. (2) Model 2 biomass estimation using vegetation index VARI regression of power/geometry and for soil estimation using multiple variable regression (MSAVI vegetation index, sediment depth, soil density). RMSE test result is 6,87089 ton 900m⁻² and RMSE% 26,0%. (3) Model 3 biomass estimation using vegetation index VARI regression power/geometry and for soil estimation using 2 variables (MSAVI corresponding vegetation index and sediment depth). RMSE test result is 6,65033 ton 900m⁻² and RMSE 25,17%. (4) Model 4 incorporation of carbon biomass estimation using vegetation VARI regression index of power/geometry and for soil estimation using multiple variable regression (MSAVI vegetation index, average sediment depth value of 100.63 cm, soil density value 1.02 g cm⁻³). RMSE test results for this model are 9.03122 ton 900m⁻² and % RMSE 34,180%.

Estimation of mangrove stock of Madura Island in 1994 was 436,552 tons, 2002 was 458,985 tons, and 2017 was 955,781 tons. The average increase of mangrove carbon stock in Madura Island from 1994-2002 was 2,804.2 tons year⁻¹, in 2002-2017 amounted to 33,119.7 tons year⁻¹. The estimation result of mangrove CO₂e content in Madura Island in 1994 was 1,602,120.2 tons, 2002 was 1,684,476.2 tons and in 2017 was 3,504,676.2 tons. Mangrove in Madura Island during 1994-2002 period can suppress CO₂ emission of 82,356.0 ton or 10,294,5 ton year⁻¹ and in period 2002-2017 can suppress CO₂ emission of 1,820,200.0 ton or 121,346,7 ton of year⁻¹.



The results of this study concluded that the comparison of biomass carbon stocks with soil carbon was 1: 4,8 for mixed mangroves, mangrove estuaries were 1:9,1, and oceanic mangroves were 1: 2,8. The best mangrove carbon stock estimation modeling is model 1. Image Sentinel-2 by combining biomass carbon stock estimation using NNIP vegetation index equation power regression and soil carbon stock estimation using 6 variable multiple regression with NDRE or WVI vegetation index. LDCM image by combining biomass carbon stock estimation using VARI vegetation index equation power/geometry regression and soil carbon stock estimation using 6 variable multiple regression with RDVI vegetation index. Models that do not require field data are model 4. Sentinel 2 image by combining NNIP vegetation index equations using power regression using power regression to estimate biomass carbon stock and variable 3 multiple regression with VIRRE vegetation index for estimating soil carbon stock. LDCM image by combining biomass carbon stock estimation using VARI vegetation index of power/geometry regression and for estimating soil carbon stock using 2 variable multiple regression with MSAVI vegetation index. Mangroves in Madura Island during the period 1994-2002 can reduce CO₂ emissions by 82.356,0 tons or 10.294,5 tons year⁻¹ and in the period 2002-2017 can reduce CO₂ emissions by 1:820.200,0 tons or 121.346,7 tons year⁻¹.

Keywords: Carbon Mangrove, Hybrid Methods, Sentinel-2



KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan pada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulisan disertasi dengan judul **“Estimasi Stok Karbon Mangrove Dengan Memanfaatkan Pemodelan Citra Satelit Penginderaan Jauh Dalam Menekan Emisi CO₂”** dapat diselesaikan dan merupakan salah satu syarat pada Program Doktor Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya Malang. Disertasi ini ditulis berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan dengan 4 tahapan, yaitu: tahap pertama analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode indeks vegetasi dan masking wilayah mangrove; tahap kedua pengukuran lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove; tahap ketiga pemodelan *hybrid* estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat; Tahap keempat evaluasi Perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017.

Sangat disadari bahwa hasil penelitian ini masih banyak kekurangannya karena keterbatasan yang dimiliki penulis, walaupun telah dikerahkan segala kemampuan untuk lebih teliti, oleh karena itu penulis mengharapkan saran yang membangun agar tulisan ini bermanfaat.

Malang, Desember 2018
Penulis

Firman Farid Muhsoni
NIM. 157080100111006



DAFTAR ISI

Halaman

IDENTITAS TIM PENGUJI	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS PENELITIAN DISERTASI	iv
SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI	v
RIWAYAT HIDUP	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISTILAH	ix
RINGKASAN	xiii
SUMMARY	xvi
KATA PENGANTAR	xix
DAFTAR ISI	xx
DAFTAR TABEL	xxiii
DAFTAR GAMBAR	xxvi
DAFTAR LAMPIRAN	xxx
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	5
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Manfaat Penelitian.....	5
1.5. Keaslian Penelitian.....	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	13
2.1. Morfologi dan Klasifikasi Mangrove.....	13
2.2. Biomassa.....	18
2.3. Karbon.....	19
2.4. Siklus Karbon Dalam Tumbuhan.....	22
2.5. Mangrove Sebagai Stok Karbon.....	24
2.6. Biomassa Mangrove.....	26
2.7. Faktor Lingkungan pada Ekosistem Mangrove.....	31
2.7.1. Salinitas.....	31
2.7.2. Pasang Surut.....	33
2.7.3. Air tanah.....	34
2.7.4. Gelombang.....	35
2.7.5. Sedimen.....	37



2.7.6. Kimia dan Biologi.....	39
2.8. Konsep Dasar Penginderaan Jauh.....	41
2.8.1. Konsep Penginderaan jauh dalam Pemetaan Vegetasi.....	44
2.8.2. Indeks Vegetasi.....	46
2.8.3. Penginderaan Jauh Satelit Sentinel-2.....	50
2.8.4. Penginderaan Jauh Satelit Landsat.....	53
2.9. Pemanfaatan Penginderaan Jauh untuk Pemetaan Mangrove.....	57
2.10. Teknologi Penginderaan Jauh Dalam Pendugaan Stok Karbon Mangrove.....	58
BAB III. KERANGKA KONSEP PENELITIAN.....	60
3.1. Kerangka Konseptual.....	60
3.2. Kerangka Operasional.....	63
BAB IV. METODE PENELITIAN.....	69
4.1. Lokasi Penelitian.....	69
4.2. Metode Penelitian.....	69
4.2.1. Tahap I : Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode indeks vegetasi dan masking wilayah mangrove.....	70
4.2.2. Tahap II : Pengukuran lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove.....	76
4.2.3. Tahap III : Pemodelan <i>hybrid</i> estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat.....	85
4.2.4. Tahap IV : Evaluasi Perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO ₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017.....	89
BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	90
5.1. Kondisi Mangrove.....	90
5.1.1. Identifikasi Jenis Mangrove.....	92
5.1.2. Kerapatan mangrove, Frekuensi Mangrove, Dominansi Mangrove dan INP (Indeks Nilai Penting).....	93
5.1.3. Pola Penyebaran (IS), Indeks Keanekaragaman (H'), Indeks Keseragaman (E) dan Indeks Dominansi (C) mangrove.....	96
5.2. Biomassa mangrove muara dan laut.....	100
5.3. Hasil Perhitungan Stok Karbon Mangrove.....	102
5.3.1. Hasil Perhitungan C Organik Tanah, Kedalaman Tanah, Kerapatan Lindak dan Ruang Pori untuk Mangrove Muara, Mangrove Laut dan Mangrove Campuran (muara-laut).....	103
5.3.2. Hasil Perhitungan Stok Karbon Tanah Mangrove Muara, Laut dan Mangrove Campuran (Muara-Laut).....	104
5.3.3. Hasil Perhitungan Stok Karbon Tanah Mangrove Berdasarkan Jarak.....	106
5.3.4. Hasil Perhitungan Stok Karbon Mangrove Total.....	108
5.3.5. Hasil Perhitungan stok karbon mangrove muara dan laut berdasarkan jarak dari pantai.....	112
5.3.6. Hasil Perhitungan Biomassa dan Karbon pada setiap spesies Mangrove.....	114
5.4. Analisis Citra Sentinel-2.....	116
5.4.1. Praprosesing Citra Sentinel-2.....	116
5.4.2. Klasifikasi wilayah mangrove pada citra Sentinel-2.....	118
5.4.3. Transformasi indeks vegetasi Citra Sentinel-2.....	119



5.4.4. Pemodelan Estimasi Stok Karbon Mangrove pada Citra Sentinel-2.....	127
5.4.5. Penentuan Model Terbaik Stok Karbon Mangrove Total untuk Citra Sentinel-2.....	153
5.5. Analisis Citra LDCM.....	163
5.5.1. Praprosesing Citra LDCM.....	163
5.5.2. Klasifikasi wilayah mangrove pada citra LDCM.....	164
5.5.3. Transformasi indeks vegetasi Citra LDCM.....	165
5.5.4. Pemodelan Estimasi Stok Karbon Mangrove pada Citra LDCM.....	170
5.5.5. Penentuan Model Terbaik Stok Karbon Mangrove Total dari Citra LDCM.....	187
5.6. Perbandingan Estimasi Karbon Mangrove Citra Sentinel-2 dengan Citra LDCM (dalam satuan ton ha ⁻¹).....	196
5.7. Perubahan Stok Karbon Mangrove Tahun 1994, 2002 dan 2017 dengan Menggunakan Citra Landsat.....	204
5.7.1. Perubahan Stok Karbon Mangrove di Pesisir Pamekasan dengan Model 1.....	204
5.7.2. Perubahan kandungan CO ₂ e dalam mangrove di Pesisir Pamekasan.....	207
5.8. Perubahan Stok Karbon Mangrove di Pulau Madura Tahun 1994, 2002 dan 2017 Menggunakan Citra Landsat.....	209
5.8.1. Perubahan Kandungan CO ₂ e dalam mangrove di Pulau Madura.....	214
5.9. Kebaruan (Novelty) Penelitian.....	219

BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN..... 223

6.1. Kesimpulan.....	223
6.2. Saran.....	225

DAFTAR PUSTAKA..... 226

LAMPIRAN..... 242



DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 1. Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian Penulis	7
Tabel 2. Dua Kelompok Utama dari Biomassa (Basu, 2010)	19
Tabel 3. Persamaan alometrik untuk menghitung biomassa pohon bakau pada biomassa di atas tanah	28
Tabel 4. Persamaan alometrik untuk menghitung biomassa pohon bakau pada biomassa dibawah tanah	30
Tabel 5. Persamaan alometrik untuk menghitung biomassa pohon bakau pada biomassa Total	30
Tabel 6. Berat jenis (ρ) dari 15 jenis mangrove	30
Tabel 7. Toleransi mangrove untuk salinitas dan frekuensi relatif mereka dengan zonasi pasang surut (Robertson & Along, 1992; Daniel M. Alongi, 2009)	32
Tabel 8. Daftar vegetasi indeks hyperspectral (Roberts <i>et al.</i> , 2012)	47
Tabel 9. Resolusi spektral dan spasial pada citra Sentinel-2 (Richter <i>et al.</i> , 2011)	52
Tabel 10. Informasi status operasional seri Landsat	55
Tabel 11. Spesifikasi sensor dan julat spektral Landsat 1-LDCM	55
Tabel 12. Tahapan penelitian	66
Tabel 13. Persamaan Indeks vegetasi yang dipergunakan pada penelitian	71
Tabel 14. Persamaan Alometrik untuk pendugaan biomassa pohon mangrove	79
Tabel 15. Nisbah akar pucuk pada berbagai tipe hutan tropis	82
Tabel 16. Berat jenis kayu untuk jenis mangrove	83
Tabel 17. Luas mangrove di Kabupaten Pamekasan	90
Tabel 18. Jenis mangrove yang ditemukan di sekitar pada setiap stasiun penelitian	93
Tabel 19. Pola Penyebaran (IS), Indeks Keanekaragaman (H'), Indeks Keseragaman (E) dan Indeks Dominansi (C) mangrove pada masing-masing stasiun.	99
Tabel 20. Biomassa pada vegerasi mangrove muara, laut dan campuran ..	101
Tabel 21. Hasil perhitungan lapang % C organik, kedalaman lumpur, kerapatan lindak, ruang pori pada mangrove muara, mangrove laut dan mangrove muara-laut.	104
Tabel 22. Hasil perhitungan stok karbon tanah untuk mangrove muara, mangrove laut dan mangrove muara-laut	105
Tabel 23. Stok Karbon mangrove pada jenis mangrove muara, laut dan campuran	109
Tabel 24. Nilai Digital Number, Nilai Radian, Nilai Reflektan hasil praprosesing citra sentinel-2.	117
Tabel 25. Peta, grafik hasil analisis 24 jenis indeks vegetasi Citra sentinel-2.	119
Tabel 26. Regresi total karbon mangrove sebagai variabel terikat dan indeks vegetasi citra sentinel-2 sebagai variabel bebas	129
Tabel 27. Regresi karbon biomassa sebagai variabel terikat dan indeks vegetasi citra Sentinel-2 sebagai variabel bebas.	131



Tabel 28. Peta, grafik dan RMSE hasil persamaan regresi karbon biomassa pada nilai indeks vegetasi citra Sentinel-2 yang mempunyai nilai determinasi > 0,8 pada citra Sentinel-2.	133
Tabel 29. Hasil uji RMSE dan model persamaan estimasi karbon biomassa citra Sentinel-2.....	139
Tabel 30. Nilai min, max, mean, std, dan RMSE hasil analisis peta kedalaman, % C, kerapatan lindak dan karbon tanah.	143
Tabel 31. Model estimasi stok karbon tanah dengan persamaan perhitungan karbon tanah.....	144
Tabel 32. Regresi karbon tanah sebagai variabel terikat dan indeks vegetasi sebagai variabel bebas.....	145
Tabel 33. Koefisien determinasi (R^2) dan Koefisien korelasi/Pearson Correlatin (R) hasil regresi berganda dengan 2 variabel, 3 variabel dan 6 variabel.....	147
Tabel 34. Peta, grafik dan RMSE hasil persamaan regresi berganda karbon tanah pada indeks vegetasi yang mempunyai nilai determinasi 4 terbesar hasil pemodelan.....	149
Tabel 35. Pemodelan total karbon mangrove dengan input : indeks vegetasi, kedalaman sedimen, kerapatan lindak dan % C organik tanah.....	154
Tabel 36. Pemodelan total karbon mangrove dengan input : indeks vegetasi, rata-rata kedalaman sedimen (100,63 cm), kerapatan lindak (1,02 g cm ⁻³) dan % C organik tanah kedalaman 0-15 cm (0,0341), % C organik tanah kedalaman 15-50 cm (0,0303), % C organik tanah kedalaman >50 cm (0,0228).	155
Tabel 37. Nilai Digital Number, Nilai Radian, Nilai Reflektan hasil praprosesing citra LDCM tanggal 9 September 2017.....	163
Tabel 38. Peta, grafik hasil analisis 14 jenis indeks vegetasi Citra LDCM....	165
Tabel 39. Karbon biomassa, karbon tanah dan karbon total sampel pada plot 30x 30m.....	171
Tabel 40. Regresi total karbon mangrove sebagai variabel terikat dan indeks vegetasi citra LDCM sebagai variabel bebas.....	172
Tabel 41. Regresi karbon biomassa sebagai variabel terikat dan indeks vegetasi citra LDCM sebagai variabel bebas.....	173
Tabel 42. Peta, grafik dan RMSE hasil persamaan regresi karbon biomassa pada nilai indeks vegetasi citra LDCM yang mempunyai nilai determinasi > 0,5.....	175
Tabel 43. Hasil uji RMSE dan model persamaan estimasi karbon biomassa Citra LDCM.....	178
Tabel 44. Regresi karbon tanah sebagai variabel terikat dan indeks vegetasi LDCM sebagai variabel bebas.....	180
Tabel 45. Koefisien determinasi (R^2) dan Koefisien korelasi/Pearson Correlatin (R) hasil regresi berganda dengan 2 variabel, 3 variabel dan 6 variabel citra LDCM.....	182
Tabel 46. Peta, grafik dan RMSE hasil persamaan regresi berganda karbon tanah pada indeks vegetasi yang mempunyai nilai determinasi 4 terbesar hasil pemodelan citra RMSE menggunakan citra LDCM.....	183
Tabel 47. Pemodelan total karbon mangrove Citra LDCM dengan input : indeks vegetasi, kedalaman sedimen, kerapatan lindak dan % C organik tanah.....	188
Tabel 48. Pemodelan total karbon mangrove dengan citra LDCM dengan input : indeks vegetasi, rata-rata kedalaman sedimen (100,63	



cm), kerapatan lindak ($1,02 \text{ g cm}^{-3}$) dan % C organik tanah kedalaman 0-15 cm (0,0341), % C organik tanah kedalaman 15-50 cm (0,0303), % C organik tanah kedalaman >50 cm (0,0228). 189

Tabel 49. Perbandingan pemodelan citra Sentinel-2 dan Citra LDCM pada model 1. 199

Tabel 50. Perbandingan pemodelan citra Sentinel-2 dan Citra LDCM pada model 2. 200

Tabel 51. Perbandingan pemodelan citra Sentinel-2 dan Citra LDCM pada model 3. 201

Tabel 52. Perbandingan pemodelan citra Sentinel-2 dan Citra LDCM pada model 4. 203

Tabel 53. Stok karbon mangrove tahun 1994, 2002, 2017 hasil estimasi citra Landsat 5, 7 dan LDCM di Pesisir Selatan Pamekasan..... 206

Tabel 54. Total CO₂e mangrove tahun 1994, 2002, 2017 hasil estimasi citra Landsat 5, 7 dan LDCM di Pesisir Selatan Pamekasan..... 209

Tabel 55. Stok karbon mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 1994 dari citra Landsat 5 tanggal 8 Juli 1994. 213

Tabel 56. Stok karbon mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 2002 dari citra Landsat 7 tanggal 23 Agustus 2002. 213

Tabel 57. Stok karbon mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 2017 dari citra Landsat 8/LDCM tanggal 9 September 2017. 213

Tabel 58. Konversi CO₂ ke Bahan Bakar Bensin dan Solar 217

Tabel 59. Kandungan CO₂ dalam mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 1994 dari citra Landsat 5 tanggal 5 Juli 1994. 218

Tabel 60. Kandungan CO₂ dalam mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 2002 dari citra Landsat 7 tanggal 23 agustus 2002. 218

Tabel 61. Kandungan CO₂ dalam mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 1994 dari citra Landsat 8/LDCM tanggal 9 September 2017. 218



DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1. Sumber karbon ekosistem (di atas tanah dan di bawah tanah) untuk beberapa jenis tutupan lahan utama dunia (Kauffman & Donato, 2012; Donato <i>et al.</i> , 2011).	2
Gambar 2. Contoh zonasi mangrove di Cilacap, Jawa Tengah (Dsikowitzky <i>et al.</i> , 2011; Hinrichs <i>et al.</i> , 2009; Noor <i>et al.</i> , 1999).	16
Gambar 3. Perbandingan luas mangrove yang tersisa di Indonesia (1986-1990) (Noor <i>et al.</i> , 1999).	17
Gambar 4. Diagram siklus karbon menunjukkan pergerakan karbon antara tanah, atmosfer, dan lautan. Warna kuning fluks alami, dan merah adalah kontribusi manusia (dalam gigaton C tahun ⁻¹). Warna putih mengindikasikan disimpan karbon. (Diagram diadaptasi dari AS DOE, Biologi dan Sistem Informasi Penelitian Lingkungan)(Riebeek, 2011).	21
Gambar 5. Perubahan dan penggunaan lahan efek global tanaman dan tanah biogeokimia C dan N sebagai masukan. Menunjukkan bagaimana perubahan iklim, CO ₂ tinggi, deposisi N, ozon atmosfer dan penggunaan lahan dapat memiliki efek langsung dan tidak langsung pada komposisi dan fungsi produsen utama berupa tanaman, aktivitas biologis tanah dan masukan gas rumah kaca ke atmosfer (Ostle <i>et al.</i> , 2009).	22
Gambar 6. Biomassa tumbuh dengan menyerap energi matahari, karbon dioksida, dan air melalui fotosintesis (Basu, 2010).	24
Gambar 7. Simpanan karbon di kawasan mangrove Indo-Pasifik, a) Mangrove muara pada delta aluvial. b) Mangrove laut pada pesisir pulau. (Donato <i>et al.</i> , 2012).	25
Gambar 8. Skema alokasi karbon yang berasal dari fotosintesis dalam pohon bakau Serasah (Alongi, 2009).	25
Gambar 9. Keseimbangan karbon pada mangrove <i>Rhizophora apiculata</i> selama 22 tahun di Matang Mangrove Forest Reserve, Malaysia (Clough <i>et al.</i> , 1997; Alongi, 2009).	26
Gambar 10. Komponen ekosistem mangrove untuk kuantifikasi biomassa mangrove dan stok karbon (Kauffman & Donato, 2012).	27
Gambar 11. Aliran air tanah melalui mangrove selama genangan pasang surut, melalui aliran langsung disebabkan oleh infiltrasi dan melalui liang pembilasan (Susilo <i>et al.</i> , 2005).	34
Gambar 12. Nilai relatif dari air tanah dibandingkan ekspor pasang surut dan arus masuk laut di Mida Creek, Kenya (Alongi, 2009).	35
Gambar 13. Model yang menunjukkan keberadaan mangrove dapat meredam gelombang tergantung dari jenis. (jenis <i>Kandelia</i> dan <i>Sonneratia</i> (Alongi, 2009).	36
Gambar 14. Diagram efek sirkulasi baroklinik, memompa pasang surut, pencampuran, dan flokulasi di zona kekeruhan maksimum dari muara model bakau (Kitheka <i>et al.</i> , 2003).	39
Gambar 15. Konsekuensi dari struktur fisik dan fungsi proses kimia dan biologi ekosistem bakau (Wolanski <i>et al.</i> , 1992; Alongi, 2009).	40
Gambar 16. Ilustrasi pengumpulan data penginderaan jauh untuk aplikasi pengguna (Thenkabail, 2015).	43



Gambar 17. Spektrum elektromagnetik band-band/saluran pada satelit penginderaan jauh (Toth & Józków, 2016)	44
Gambar 18. Interaksi radiasi daun pada tingkat mikroskopis dengan panjang gelombang tertentu. Ketebalan panah sebanding dengan besarnya fluks radiasi (Silva <i>et al.</i> , 2008)	45
Gambar 19. Satelit Sentinel-2 (Drusch <i>et al.</i> , 2012)	51
Gambar 20. Resolusi Spektral Band dan Resolusi Spasial Sentinel-2 (Gatti, Bertolini, & Acs, 2016)	52
Gambar 21. Band spektral dibandingkan resolusi spasial untuk Sentinel-2 MSI, SPOT-6/7 dan LDCM OLI instrumen. Luas area cover 290 km (MSI), 185 km (LDCM), dan 60 km (SPOT)(Drusch <i>et al.</i> , 2012)	53
Gambar 22. Generasi satelit landsat 1-8 (LDCM) (https://landsat.gsfc.nasa.gov/a-landsat-timeline/)	56
Gambar 23. Karakteristik spektral dan parameter yang mempengaruhi jenis mangrove <i>Avicennia marina</i> dan <i>Rhizophora konjugat</i> yang diukur dengan spektrometer lapangan di Ca Mau Province, Vietnam, Januari 2010. (Kuenzer <i>et al.</i> , 2011)	58
Gambar 24. Kerangka Konsep Penelitian	62
Gambar 25. Kerangka Operasional Penelitian Tahap I	63
Gambar 26. Kerangka Operasional Penelitian Tahap II	64
Gambar 27. Kerangka Operasional Penelitian Tahap III	65
Gambar 28. Kerangka Penelitian Operasional Tahap IV	66
Gambar 29. Peta Lokasi Penelitian	69
Gambar 30. Desain pengambilan sampel lapangan di transek untuk memperkirakan karbon di atas dan di bawah tanah yang dimodifikasi (Murdiyarto <i>et al.</i> , 2009; Kauffman & Donato, 2012; Hairiah, <i>et al.</i> , 2001)	74
Gambar 31. Titik sampel di Desa Manjungan Kecamatan Pademawu Kabupaten Pamekasan	75
Gambar 32. Contoh bentuk plot persegi	76
Gambar 33. Pengukuran diameter setinggi dada pada berbagai kondisi pohon(SNI 7724:2011) (Hairiah <i>et al.</i> , 2001)	78
Gambar 34. Tingkat keutuhan pohon mati(Kauffman & Donato, 2012)	81
Gambar 35. Peta kondisi mangrove di lokasi penelitian	91
Gambar 36. Grafik biomassa mangrove permukaan, tanaman bawah dan bawah permukaan untuk mangrove muara, laut dan campuran	102
Gambar 37. Karbon tanah untuk mangrove muara, mangrove laut dan mangrove muara-laut	105
Gambar 38. a) Kerapatan lindak (g cm^{-3}) berdasarkan jarak mangrove; b) Ruang Pori tanah (%) berdasarkan jarak mangrove; c) Kedalaman sedimen berdasarkan jarak mangrove; d) Stok karbon tanah berdasarkan kedalaman tanah dan jarak mangrove	107
Gambar 39. Grafik Karbon mangrove pada jenis mangrove muara, laut dan campuran	111
Gambar 40. Diagram prosentase stok karbon pada (a) Mangrove muara, (b) Mangrove Laut dan (c) mangrove muara-laut	111
Gambar 41. Grafik Karbon mangrove pada setiap jarak	113
Gambar 42. Grafik Karbon mangrove pada setiap jarak berdasarkan mangrove muara dan mangrove laut	113



Gambar 43. Grafik stok biomassa pada setiap spesies mangrove di lokasi penelitian.....	115
Gambar 44. Grafik stok karbon pada setiap spesies mangrove di lokasi penelitian.....	115
Gambar 45. Prosentase stok karbon mangrove pada setiap spesies mangrove di lokasi penelitian	116
Gambar 46. Citra Sentinel-2 tanggal 25 Juli 2017.....	116
Gambar 47. Peta mangrove hasil metode <i>Otsu Threshold</i> dari NDVI.....	118
Gambar 48. Peta Kedalaman sedimen hasil analisis interpolation pengukuran data lapang (2017).....	140
Gambar 49. Peta kerapatan lindak hasil analisis interpolation pengukuran data lapang (2017).....	141
Gambar 50. Peta % C organik tanah pada kedalaman 0-15 cm hasil analisis interpolation pengukuran data lapang (2017).....	141
Gambar 51. Peta % C organik tanah pada kedalaman 15-50 cm hasil analisis interpolation pengukuran data lapang (2017).....	142
Gambar 52. Peta % C organik tanah pada kedalaman >50 cm hasil analisis interpolation pengukuran data lapang (2017).....	142
Gambar 53. Stok Karbon tanah hasil pemodelan dengan persamaan perhitungan karbon tanah.....	144
Gambar 54. Peta karbon mangrove hasil Model 1-1	157
Gambar 55. Peta karbon mangrove hasil Model 1-2	158
Gambar 56. Peta karbon mangrove hasil Model 2	159
Gambar 57. Peta karbon mangrove hasil Model 3	160
Gambar 58. Peta karbon mangrove hasil Model 4	161
Gambar 59. Citra LDCM tanggal 9 September 2017	163
Gambar 60. Peta mangrove Citra LDCM tanggal 9 September 2017.....	164
Gambar 61. Peta, grafik dan RMSE hasil metode perhitungan persamaan karbon tanah.....	179
Gambar 62. Peta stok karbon mangrove hasil Model 1 citra LDCM.....	192
Gambar 63. Peta karbon mangrove hasil Model 2 citra LDCM.....	193
Gambar 64. Peta karbon mangrove hasil Model 3 citra LDCM.....	194
Gambar 65. Peta karbon mangrove hasil Model 4 citra LDCM.....	195
Gambar 66. Perbandingan Peta dan grafik estimasi karbon mangrove hasil model 1 pada citra Sentinel-2 dan LDCM.....	198
Gambar 67. Perbandingan Peta dan grafik estimasi karbon mangrove hasil model 2 pada citra Sentinel-2 dan LDCM.....	200
Gambar 68. Perbandingan Peta dan grafik estimasi karbon mangrove hasil model 3 pada citra Sentinel-2 dan LDCM.....	202
Gambar 69. Perbandingan Peta dan grafik estimasi karbon mangrove hasil model 4 pada citra Sentinel-2 dan LDCM.....	203
Gambar 70. Peta Stok Karbon Mangrove (a) tahun 1994 dari citra Landsat 5, (b) tahun 2002 dari citra Lansat 7 dan (c) 2017 dari citra Landsat 8 (LDCM).....	207
Gambar 71. Peta CO2 Mangrove (a) tahun 1994 dari citra Landsat 5, (b) tahun 2002 dari citra Lansat 7 dan (c) 2017 dari citra Landsat 8 (LDCM).....	209
Gambar 72. Peta Stok Karbon Mangrove tahun 1994 dari citra Landsat 5 tanggal 8 Juli 1994 di Pulau Madura.....	211
Gambar 73. Peta Stok Karbon Mangrove tahun 2002 dari citra Landsat 7 tanggal 23 Agustus 2002 di Pulau Madura	212
Gambar 74. Peta Stok Karbon Mangrove tahun 2017 dari citra Landsat 8/ LDCM tanggal 9 September 2017 di Pulau Madura.....	212



Gambar 75. Peta kandungan CO ₂ dalam mangrove tahun 1994 dari citra Landsat 5 tanggal 5 Juli 1994 di Pulau Madura.....	215
Gambar 76. Peta kandungan CO ₂ dalam mangrove tahun 2002 dari citra Landsat 7 tanggal 23 agustus 2002 di Pulau Madura.....	215
Gambar 77. Peta kandungan CO ₂ dalam mangrove tahun 2017 dari citra Landsat 8/ LDCM tanggal 9 September 2017 di Pulau Madura.....	216



DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1. Foto Jenis Mangrove Sejati dan Ikutan di Lokasi Penelitian 242

Lampiran 2. Perhitungan Kerapatan Mangrove, Frekuensi Mangrove, Dominansi Mangrove dan INP..... 248

Lampiran 3. Biomassa Mangrove Hasil Perhitungan Data Lapang..... 259

Lampiran 4. Stok karbon pada pohon, akar, tanaman bawah, tanah kedalaman (0-15 cm, 15-50 cm dan > 50 cm), kerapatan lindak, ruang pori, kedalaman lumpur..... 262

Lampiran 5. Foto pengambilan sampel pada setiap stasiun..... 265

Lampiran 6. Publikasi dalam Jurnal International 271



BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Akhir-akhir ini pemanasan global menjadi isu yang mendunia. Pemanasan

global mengakibatkan terjadi perubahan iklim. Perubahan iklim ini disebabkan

karena terjadi peningkatan gas di atmosfer atau yang sering disebut gas rumah

kaca. Gas rumah kaca ini akibat akumulasi karbon di atmosfer karena pembakaran

bahan bakar fosil (kendaraan bermotor dan industri) (Griggs, 2002; IPCC, 2001;

Komiyama, *et al.*, 2008). Tahun 2016 emisi gas rumah kaca mencapai sekitar 52

Gt CO₂e tahun⁻¹ emisi gas rumah kaca ini kurang lebih dua kali lipat sejak tahun

1970 dan meningkat secara signifikan tahun 2000. Emisi ini sebagian besar

dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, semen dan lainnya (mencapai

70%). Hal ini mengakibatkan peningkatan suhu, peningkatan suhu 1,5^o-2^o C

menyebabkan pemanasan global (UNEP, 2017). Indonesia sebagai negara

penghasil emisi ke 12 tahun 2015 dengan emisi sebesar 502,96 Mt atau 1,39 %

dari total emisi di dunia (EDGAR, 2015)

Perubahan iklim global ini menyebabkan terganggunya keseimbangan

energi antara bumi dan atmosfer, yang dipengaruhi gas asam arang atau karbon

dioksida (CO₂), metana (CH₄) dan nitrous oksida (N₂O) disebut gas rumah kaca

(Hairiah & Rahayu, 2007). Disahkannya Undang Undang no 6 tahun 1994

tentang pengesahan konvensi kerangka kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa

mengenai perubahan iklim (*United Nations Framework Convention on Climate*

Change) menjadikan Indonesia harus berperan aktif dengan negara internasional

lainnya untuk mencegah peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Hal

ini disebabkan karena Indonesia mempunyai hutan tropis terbesar kedua di dunia

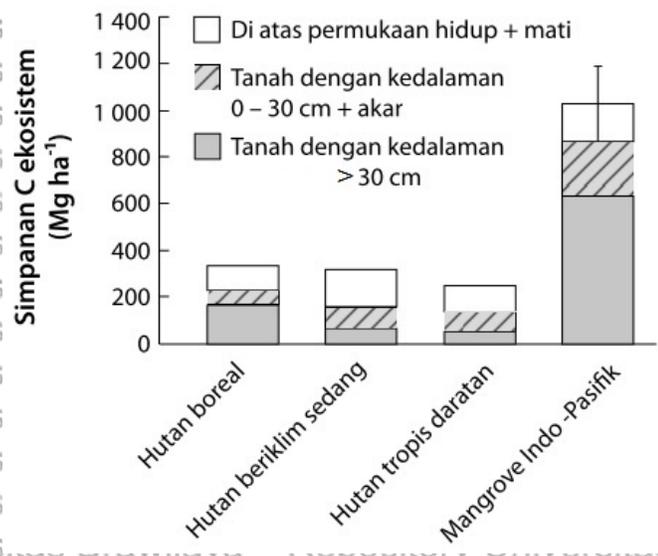
dan merupakan negara kepulauan yang memiliki laut terluas yang mempunyai

fungsi penyerap karbon dioksida.



Penebangan hutan mengakibatkan berkurangnya vegetasi hutan yang salah satu fungsinya untuk penyerapan CO₂. Hutan di Indonesia mempunyai potensi menyerap emisi gas sampai 48%. Pengelolaan hutan sangat penting untuk penyerap karbon (Wibowo, 2010). Mangrove merupakan salah satu ekosistem hutan yang mampu mengurangi terjadinya efek rumah kaca yang menyebabkan perubahan iklim (Komiya, *et al.*, 2008).

Informasi dan data tentang mangrove yang berfungsi sebagai penyerap karbon masih relatif minim (Klinkhamer, 1995). Hasil beberapa penelitian menjelaskan bahwa kemampuan ekosistem mangrove dalam menyimpan karbon yang tertinggi dibandingkan dengan hutan tropis, hutan subtropis dan hutan boreal (kawasan hutan yang bersebelahan dengan padang lumut sepanjang garis pepohonan kutub utara) seperti pada Gambar 1. Sebagian besar karbon yang tersimpan di bawah tanah yang kaya organik (Kauffman & Donato, 2012; Donato *et al.*, 2012; Page *et al.*, 2011; Hooijer *et al.*, 2010).



Gambar 1. Sumber karbon ekosistem (di atas tanah dan di bawah tanah) untuk beberapa jenis tutupan lahan utama dunia (Kauffman & Donato, 2012; Donato *et al.*, 2011).

Mangrove juga mempunyai fungsi menyediakan bahan makanan bagi kehidupan manusia terutama ikan, udang dan kepiting serta sumber energi bagi



kehidupan di pantai (Noor *et al.*, 1999; Bismark *et al.*, 2008; Kauffman & Donato, 2012). Mangrove merupakan jembatan antara lautan dengan daratan. Mangrove sebagai habitat beraneka ragam biota perairan, tempat asuhan dan pembesaran, pemijahan dan pengatur iklim mikro (Brown, 1997). Selain itu fungsi mangrove sebagai sedimen trap, menjadikan wilayah ini kandungan karbon tanah yang tersimpan sangat besar dibandingkan karbon vegetasinya.

Mangrove hanya menempati 2% wilayah pesisir di dunia dengan fungsi sekitar 5% dari produksi primer, 12% dari ekosistem untuk respirasi dan sekitar 30% untuk penyerapan karbon. Luas Mangrove hanya 0,7% dari luas hutan tropis, tetapi kehancuran atau kerusan mangrove akan menyuplai 10% CO₂ dari penggundulan mangrove tersebut (Alongi & Mukhopadhyay, 2015). Tanah mangrove dengan kandungan organik tinggi memiliki kedalaman antara 0,5–3 m dan memiliki stok karbon sebesar 49–98% (Donato *et al.*, 2012).

Luas mangrove di seluruh dunia beragam hasil penelitian Valiela *et al.* (2001) mendapatkan luas 16,6 juta ha. Sedangkan Giri *et al.* (2011) mendapatkan luas mangrove tahun 2000 seluas 13,77 juta ha, yang terdapat di 118 negara tropis dan subtropis. Kauffman & Donato (2012) dan Giri *et al.* (2011) mendapatkan luas mangrove untuk kawasan Asia mencapai 6,8 juta ha atau 34–42%, Afrika mencapai 20%, Amerika Utara dan Tengah mencapai 15%, Oceania mencapai 12%, Amerika Selatan mencapai 11% dan Australia mencapai 7%.

Lima puluh tahun terakhir sepertiga mangrove di dunia hilang, namun sebagian besar data yang ada menunjukkan nilai yang berbeda. Rusaknya mangrove berhubungan dengan kepadatan populasi manusia. Alasan utama untuk pembangunan perkotaan, budidaya, pertambangan dan eksploitasi kayu. Kedepan masalah penebangan, budidaya dan eksploitasi yang berlebih akan berakibat pada perubahan hidrologi, populasi dan pemanasan global (Alongi, 2002; Bouillon, 2011). Lebih dari 50% mangrove dunia hancur, dalam dua



dekade terakhir 35% kerusakan akibat budidaya dan pengembangan pesisir (Feller *et al.*, 2010). Jenis mangrove (sebanyak 70 jenis) atau 16% berada pada ancaman kepunahan (Polidoro *et al.*, 2010). Noor *et al.* (1999) menjelaskan mangrove di Indonesia tahun 1986-1990 mengalami penurunan sampai 40% dari 4.131.000 ha menjadi 2.490.000 ha.

Tiga puluh tahun terakhir mangrove di Indonesia hilang hampir 800.000 ha (Ilman *et al.*, 2016). Luas mangrove di Pulau Jawa mengalami penurunan yang signifikan dari tahun 1985-1997 dari 170.500 ha menjadi 19.077 ha, hal ini terjadi karena perubahan mangrove secara besar besaran menjadi lahan tambak. Perubahan mangrove menjadi lahan tambak di Jawa paling besar di Jawa Timur (Setyawan *et al.*, 2003). Hutan mangrove mempunyai stok karbon rata-rata lebih tinggi dibandingkan hutan lain (Hutan lahan kering, hutan gambut dan hutan tanaman). Stok karbon hutan mangrove primer nasional rata-rata sebesar 188,3 ton ha⁻¹ dan hutan mangrove sekunder 94,07 ton ha⁻¹. (Rochmayanto *et al.*, 2014)

Mangrove sangat potensial menyimpan stok karbon dalam mengurangi emisi CO₂. Diperlukan data yang valid dengan metode yang tepat, sehingga didapatkan informasi stok karbon mangrove yang akurat. Informasi ini penting untuk majemen pengelolaan hutan mangrove ke depan. Penelitian ini mencoba mengembangkan model hybrid dalam melakukan estimasi stok karbon mangrove dengan memanfaatkan citra penginderaan jauh. Data citra yang dipergunakan dalam penelitian ini merupakan data citra yang mudah diakses, yaitu : citra Sentinel-2 dan Landsat (Landsat 5, Landsat 7 dan LDCM). Model yang dipergunakan adalah model *hybrid* dengan mengkombinasikan antara data citra satelit dengan data lapang (kedalaman tanah/sedimen, kerapatan lindak, dan karbon tanah). Model ini yang nantinya dipergunakan untuk melihat perubahan stok karbon mangrove selama 10 tahun terakhir.



1.2. Perumusan Masalah

1. Seberapa besar peran hutan mangrove dalam menyimpan stok karbon untuk mengurangi emisi CO₂.
2. Bagaimana penggunaan teknik penginderaan jauh dalam perhitungan stok karbon mangrove melalui model hybrid untuk mendapatkan stok karbon mangrove yang lebih akurat.
3. Berapa besar perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara multi tahun di Pulau Madura.

1.3. Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan data perbandingan estimasi stok karbon mangrove pada mangrove muara dan mangrove laut.
2. Mendapatkan model perhitungan stok karbon mangrove dengan akurasi lebih baik menggunakan citra satelit Sentinel-2 dan LDCM
3. Mendapatkan data perubahan stok karbon mangrove di Pulau Madura tahun 1994, 2002 dan 2017 dan konversi karbon ke CO₂.

1.4. Manfaat Penelitian

- Manfaat teoritis : Hasil penelitian ini menghasilkan model yang dapat dipergunakan untuk estimasi stok karbon mangrove pada suatu wilayah secara cepat, dengan menggunakan citra satelit Sentinel-2 dan LDCM dengan akurasi yang baik.
- Manfaat praktis : Pemetaan stok mangrove pada wilayah pesisir, sangat bermanfaat jika dilakukan pengembangan pesisir (untuk budidaya tambak, ekowisata atau perubahan lahan lainnya). Penentuan lokasi harus memperhitungkan stok karbon mangrove, sehingga fungsi ekologis mangrove sebagai penyimpan karbon terbesar tidak terganggu.

1.5. Keaslian Penelitian

Penelitian berkenaan dengan estimasi stok karbon mangrove dengan memanfaatkan citra satelit dengan pendekatan metode *hybrid* dengan indeks



vegetasi belum dilakukan. Penggunaan citra satelit sentinel-2 yang relatif baru untuk estimasi karbon mangrove juga belum ada yang melakukan. Tabel 1 menjelaskan penelitian-penelitian yang mengkaji biomassa atau stok karbon vegetasi hutan atau mangrove dengan menggunakan citra satelit penginderaan jauh. Beberapa citra satelit yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah : Landsat (Li *et al.*, 2007; Vicharnakorn *et al.*, 2014), EO-1 Hyperion (Yu *et al.*, 2014), Worldview-2 (Eckert, 2012), Radarsar (Li *et al.*, 2007), Geo Eye dan data elevasi satelit ASTER (Jachowski *et al.*, 2013), Quickbird (Hirata *et al.*, 2014), LIDAR (Kulawardhana *et al.*, 2014), ALOS (Wahyuni, 2014; Hamdan *et al.*, 2014; Frananda *et al.*, 2015; Danoedoro *et al.*, 2015; Wicaksono *et al.*, 2016), Geo Eye, Quickbird dan ALOS (Hartoko *et al.*, 2015), Sentinel 1 (Dabrowska-Zielinska *et al.*, 2016).

Sedangkan penelitian ini menggunakan data citra sentinel-2 dan LDCM dengan metode *hybrid* menggunakan pendekatan 24 indeks vegetasi (BR, GNV, GR, SAVI, MSAVI, NDRE, NDVI, NDVI2, NDWI, NNIP, PSRI, RR, RVI, SVI, VIRE, VIRRE, WVVI, MTV1, MTV2, RDVI, VARI, VIGeen, MSR, TVI). Estimasi karbon mangrove dilakukan pada biomassa vegetasi mangrove dan tanah/sedimen mangrove. Berbeda dengan penelitian Frananda *et al.*, (2015) dan Danoedoro *et al.*, (2015) yang menggunakan citra ALOS dan pendekatan 6 jenis indeks vegetasi. Pada penelitian ini tidak memperhitungkan tanah/sedimen mangrove. Penelitian Wicaksono *et al.*, (2016) menggunakan citra ALOS AVNIR-2 dengan pendekatan 10 indeks vegetasi, juga tidak memperhitungkan tanah/sedimen mangrove. Penelitian Eckert (2012) menggunakan satelit Worldview-2, hanya menggunakan indeks vegetasi EVI. Penelitian Vicharnakorn *et al.*, (2014) menggunakan citra Landsat TM dengan pendekatan indeks vegetasi RVI, SAVI dan SR. Penelitian Li *et al.*, (2007) menggunakan citra Radarsar dan Landsat TM dengan pendekatan Indeks vegetasi NDVI dan *backscatter*.



Tabel 1. Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian Penulis

No	Sumber	Citra yang dipergunakan	Tujuan	Metode/Model Estimasi Stok Karbon	Hasil
1	Li <i>et al.</i> , (2007)	Radarsar dan Landsat TM	Membandingkan antara citra Landsat TM optik dan Radarsar untuk memperkirakan biomassa mangrove di Provinsi Guandong di Cina Selatan	Model regresi terbaik menggunakan NDVI and backscatter ($R=0,769$ dan $R^2=0,738 \text{ kg m}^{-2}$): $Y=3,761-24,179*NDVI+52,710*NDVI^2-0,084e^0+0,001e^{02}$	Studi ini menunjukkan data Radarsar dapat menghasilkan estimasi biomassa yang lebih akurat untuk pohon mangrove karena resolusi tinggi dan fitur sampingnya. penelitian ini menunjukkan bahwa NDVI memiliki kekurangan yang signifikan dalam memperkirakan biomasa lahan basah.
2	Vicharnakorn <i>et al.</i> , (2014)	Landsat TM	Mengetahui total biomassa di atas tanah (AGB) dan stok karbon untuk jenis tutupan lahan yang berbeda di Provinsi Savannakhet, Republik Demokratik Rakyat Laos	$AGB = -1716,153 + (2071,324 \times RVI) + (1676,510 \times SAVI) + (-72,293 \times SR)$ $AGB = \text{above-ground biomass}$, $RVI = \text{ratio vegetation index}$ $SAVI = \text{soil-adjusted vegetation index}$ $SR = \text{simple ratio}$	Hasil penelitian menunjukkan hubungan yang signifikan antara data biomassa di atas tanah dan <i>Remote Sensing</i> . Spesies yang dominan <i>Pterocarpus macrocarpus</i> Kurz, <i>Dipterocarpus tuberculatus</i> Roxb, dan <i>Cananga odorata</i> .
3	Yu <i>et al.</i> , (2014)	EO-1 Hyperion	data EO-1 Hyperion diselidiki untuk menentukan apakah mereka dapat menangkap variasi temporal dan memperkirakan variabilitas spasial fluks hutan C	$GPP = 2,170 + 0,034 * e^{12,951 * SPRI * NDVI}$ $Re = 1,357 + 0,261 * e^{7,762 * SPRI * NDVI}$ $GPP = \text{gross primary production}$ $Re = \text{ecosystem respiration}$ $SPRI = \text{scaled photochemical reflectance index}$ $NDVI = \text{normalized difference vegetation index}$	Diantara 19 indeks, lima indeks yang memiliki R^2 yang sesuai: <i>Chlorophyll Index</i> , <i>RedEdge</i> , <i>scaled photochemical reflectance index (SPRI)*enhanced vegetation index (EVI)</i> , <i>SPRI*NDVI</i> , <i>MCARI/OSAVI and the Vogelmann Index</i> , <i>one broad band index (EVI)</i> , <i>SPRI*NDVI</i> , <i>MCARI / OSAVI and Vogelmann Indeks</i> , dan <i>one broad band (EVI)</i> . $SPRI*NDVI$ memiliki koefisien determinasi yang signifikan.

No	Sumber	Citra yang dipergunakan	Tujuan	Metode/Model Estimasi Stok Karbon	Hasil
4	Eckert, (2012)	World view-2	Mengeksplorasi potensi data World View-2 untuk estimasi biomassa dan karbon hutan hujan tropis	Hutan yang terdegradasi : $Y_{deg}=10,89*X1-736,22*X2-131,40*X3+456,55$ $X1=GLCM15cor5$ $X2=GLCM21ASM5$ $X3=GLCM23Con5$ Hutan yang tidak terdegradasi : $Y_{low}=12758,5*X1-4,72*X2-274,42*X3-11,07*X4-2,776*X5-4191,49$ $X1=EVI2$ $X2=GLCM23Var7$ $X3=GLCM21Var1$ $X4=GLCM23Mean8$ $X5=GLCM23Corr5$	indeks vegetasi EVI memiliki hubungan kuat dengan data lapangan biomassa dan karbon untuk hutan yang tidak terdegradasi. Model terbaik untuk hutan terdegradasi menggunakan model <i>Correlation, Angular Second Moment, and Contrast</i> mencapai R^2 0,843 dan RMSE relatif 6,8% untuk biomassa dan karbon. Hutan yang tidak terdegradasi menggunakan model EVI (R^2 disesuaikan = 0,816, RMSE relatif = 11,8%)
5	Jachowski et al., (2013)	Geo Eye dan data elevasi satelit ASTER	Menilai biomassa dan keragaman spesies dalam ekosistem mangrove di Pantai Andaman Thailand	<i>Rhizophora spp.</i> $(Y=0,16*(Elevation)+0,27*(Band1)/(Band2)-0,11*(Band2)+0,41*(Band 4)-0,03$	Gabungan biomassa di atas tanah dan di bawah tanah 151 ha^{-1} adalah $345 (\pm 72,5) \text{ Mg ha}^{-1}$, setara dengan $155 (\pm 32,6) \text{ Mg Cha}^{-1}$. Evaluasi model menunjukkan bahwa model tersebut memiliki kesalahan prediksi terbesar pada biomassa yang tinggi.
6	Hirata et al., (2014)	Quickbird	Mengetahui hubungan alometrik antara data satelit beresolusi tinggi dan diameter batang dan menggunakan model yang dihasilkan untuk memperkirakan biomassa di atas tanah	- <i>Rhizophora spp.</i> ($R^2=0,67$) $(Y = 7,13*X^{0,345})$ - <i>Bruguiera spp.</i> ($R^2=0,61$) $(Y = 9,01*X^{0,207})$ - <i>Avicennia alba</i> ($R^2=0,64$) $(Y = 6,91*X^{0,479})$ - <i>Sonneratia alba</i> ($R^2=0,95$) $(Y = 13,5*X^{0,246})$	Sifat pantulan spektral mangrove <i>A. alba</i> dan <i>S. alba</i> jelas berbeda, sedangkan spesies <i>Rhizophora</i> dan <i>Bruguiera</i> serupa di kebanyakan band, membuat identifikasi spesies ini lebih sulit.

No	Referensi	Citra yang dipergunakan	Tujuan	Metode/Model Estimasi Stok Karbon	Hasil
7	Kulawaldhana et al. (2014)	LIDAR	Mengevaluasi kegunaan citra ultrasonik dengan lidar untuk meningkatkan prediktabilitas model regresi untuk mengukur biomassa dan karbon di atas tanah	$BM = 15,51 * Lmax + 5,35 * LCD + 1331,7 * VIGreen + 639,13$ $BM = Biomassa$ $Lmax = \text{Maksimum ketinggian LIDAR}$ $LCD = \text{Canopy density (Kerapatan kanopi)}$ $VIGreen = \text{Green vegetation index}$	Model prediksi biomassa terbaik RMSEs yang sangat rendah dan % RMSEs mendekati 20%, yang merupakan ambang kesalahan yang direkomendasikan untuk model prediksi biomassa hutan berbasis penginderaan jauh. Temuannya menunjukkan bahwa lidar dibandingkan dengan data spektral dapat memberikan perkiraan yang lebih baik mengenai biomassa dan karbon di atas tanah.
8	Wahyuni, (2014)	ALOS PALSAR	pemanfaatan citra ALOS PALSAR memetakan biomassa atas permukaan hutan di kawasan TN Bogani Nani Wartabone	Model terbaik: $-Y = 9501,8 + 987,38 * HH$ Dengan $R^2 = 0,875$ dan $RMSE = 2,02$ $-Y = 16211,03 + 1135,69 * HV$ Dengan $R^2 = 0,867$ dan $RMSE = 1,85$	Rata-rata stok karbon sebesar 274,13 ton C ha ⁻¹ dan 463,13 ton C ha ⁻¹ , serta 1.395,35 ton C ha ⁻¹ dan 220,79 ton C ha ⁻¹ . Menggunakan data citra ALOS PALSAR resolusi 50 m didominasi oleh kelas biomasa dengan stok biomassa sebesar 0-5.000 ton ha ⁻¹ .
9	Hamdan et al., (2014)	ALOS	Mengevaluasi hubungan antara koefisien satelit <i>Advanced Land Observing Satellite</i> (ALOS) dan biomassa di atas tanah (AGB) hutan mangrove buatan di Malaysia.	Biomass diatas tanah : $<100 \text{ mg ha}^{-1}$ dengan $R = 0,790$, $R^2 = 0,624$ dan residual error $\pm 14,17 \text{ mg ha}^{-1}$: $y = 1,3668 \ln(x) + 21,495$ $100-150 \text{ mg ha}^{-1}$ dengan $R = 0,175$, $R^2 = 0,030$ dan residual error $\pm 16,21 \text{ mg ha}^{-1}$: $y = 0,0082 * x - 16,208 > 150 \text{ mg ha}^{-1}$ dengan $R = 0,105$, $R^2 = 0,011$ dan residual error $\pm 40,27 \text{ mg ha}^{-1}$: $y = -0,0014 * x - 15,07$	Studi tersebut mendapatkan perkiraan biomassa di atas tanah (AGB) di Matang Mangrove berkisar antara 2,98 dan 378,32 \pm 33,90 Mg ha ⁻¹ dengan rata-rata 99,40 \pm 33,90 Mg ha ⁻¹ dan total AGB sekitar 4,25 juta Mg. <i>HV backscatter</i> mulai jenuh pada AGB sebesar 100 Mg ha ⁻¹ dan kesalahan estimasi terjadi ketika AGB melebihi 150 Mg ha ⁻¹ .

No	Referensi	Citra yang dipergunakan	Tujuan	Metode/Model Estimasi Stok Karbon	Hasil
10	Franda et al., (2015)	ALOS	Mengetahui sejauh mana data penginderaan jauh dan transformasi indeks vegetasi dapat dimanfaatkan dalam mengestimasi stok karbon pada kawasan hutan mangrove	Menggunakan indeks vegetasi SR, NDVI, TVI, RVI, SAVI, EVI, model yang terbaik: $Y=30,80*TVI+16,4$ $R^2=0,72$ dan $RMSE$ of $EVI \pm 74,40139$ ton ha^{-1}	EVI dan TV memiliki korelasi dan akurasi indeks vegetasi terbaik untuk memperkirakan stok karbon hutan mangrove dengan EVI nilai $R^2 = 0,72$ dan $TVI = 0,63$, dan $RMSE$ $EVI \pm 74,40139$ ton ha^{-1} dan $TVI \pm 39,70762$ ton ha^{-1} . Indeks vegetasi EVI dan TVI memiliki korelasi dan akurasi terbaik untuk memperkirakan hutan mangrove karbon.
11	Dandodoro et al., (2015)	ALOS AVNIR	Mengkaji pengaruh koreksi radiometrik citra multispektral ALOS AVNIR-2 terhadap akurasi model estimasi stok karbon vegetasi tegakan di Semarang bagian timur dengan menggunakan indeks vegetasi	Menggunakan enam indeks vegetasi, yaitu (a) EVI2, (b) NDVI, (c) TVI, (d) ARVI, (e) SAVI, dan (f) MSARVI. Model terbaik: - Indeks vegetasi MSARVI yang dikoreksi hingga <i>at-sensor reflectance</i> dengan $R=0,779$, $R^2=0,606$ dan $RMSE=0,3450$ $X = (\ln(Y/0,026))/0,205$ - Indeks vegetasi MSARVI yang dikoreksi hingga <i>at-surface reflectance</i> dengan $R=0,793$, $R^2=0,628$ dan $RMSE=0,3493$ $X = (\ln(Y/0,026))/0,205$	Hasil penelitian mendapatkan, (1) koreksi <i>at-sensor</i> dan <i>at-surface reflectance</i> merupakan metode koreksi yang paling efektif untuk estimasi stok karbon, (2) MSARVI dengan model regresi eksponensial berbasis koreksi <i>at-sensor reflectance</i> dan <i>at-surface reflectance</i> merupakan transformasi yang paling akurat untuk estimasi stok karbon vegetasi.
12	Wicaksono et al., (2016)	ALOS AVNIR-2	memetakan stok karbon mangrove dan memperkirakan total stok karbon biomassa yang terlindungi oleh hutan mangrove, di Kepulauan Karimunjawa sebagai lokasi studi,	Menggunakan indeks vegetasi SR, DVI, NDVI, ARVI, VARI, TVI, EVI1, EVI2, MSARVI, GEMI, Model terbaik: Vegetasi diatas tanah dengan koreksi <i>sensor radiance</i> untuk Index EVI1 ($R^2=0,688$, $SE=5,89$ kg C m^{-2} , Accuracy 77,1%) $-376,29(EVI1)-75,146$ Vegetasi dibawah tanah dengan koreksi	Keakuratan peta stok karbon di atas tanah terbaik yang dimodelkan dari indeks vegetasi EVI1 sebesar 77,1% (5,89 kg C m^{-2}), dan untuk stok karbon di bawah tanah dari indeks vegetasi GEMI sebesar 60,0% (2,54 kg C m^{-2}).



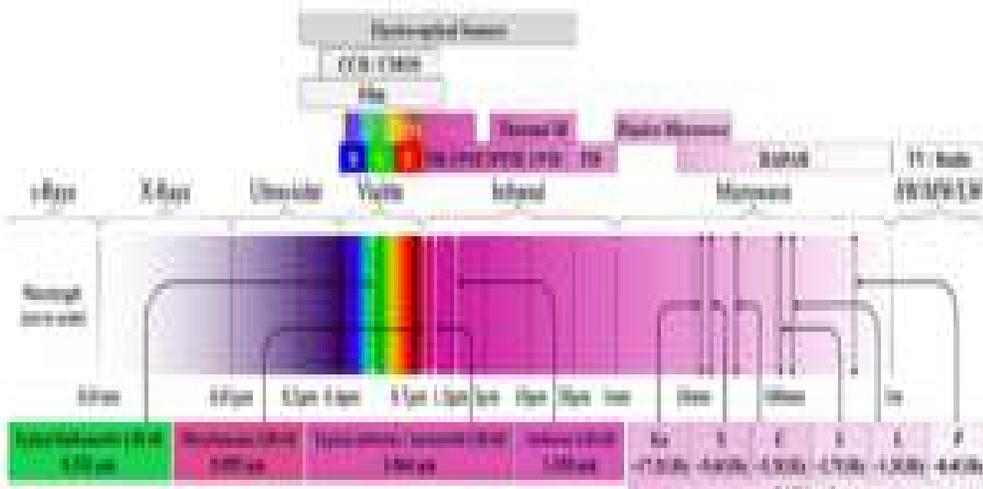
No	Referensi	Citra yang digunakan	Tujuan	Metode/Model Estimasi Stok Karbon	Hasil
13	Hartono <i>et al.</i> , (2013)	Geo Eye, Quickbird dan ALOS	Menghitung karbon vegetasi mangrove di atas tanah melalui persamaan alometrik, dan membangun algoritma model spasial setiap spesies mangrove di Karimunjawa.	<p>surface reflectance untuk Index GEMI ($R^2=0,567$, $SE=2,54$ kg C m², Accuracy 60%) 310,64(GEMI)-122,01</p> <p>Quickbird data : <i>Ceriops tagal</i> $Y = -0,003(B2/B3)^2 + 0,267(B2/B3) - 3,452$; <i>Rhizophora apiculata</i> $Y = 0,001(B2/B3)^2 - 0,116(B2/B3) + 3,415$; <i>Bruguiera cylindrical</i> $Y = -0,003(B2/B3)^2 + 0,336(B2/B3) - 7,265$; <i>Xylocarpus granatum</i> $Y = 0,0001(B2/B3)^2 - 0,058(B2/B3) + 2,101$; <i>Rhizophora mucronata</i> $Y = 0,0001(B2/B3)^2 - 0,022(B2/B3) + 1,941$;</p> <p>Geo Eye satellite data : <i>Rhizophora mucronata</i> $Y = -0,0436(B2/B3)^2 + 0,526(B2/B3) - 1,4642$; <i>Bruguiera gymnorrhiza</i> $Y = -0,0027(B2/B3)^2 + 0,0649(B2/B3) - 0,2432$; <i>Bruguiera cylindrical</i> $Y = -0,0089(B2/B3)^2 + 0,0632(B2/B3) - 0,0683$</p> <p>ALOS-AVNIR satellite data : <i>Avicennia marina</i> $Y = -79,18((B1-B2)/(B1+B2))^2 + 31,35((B1-B2)/(B1+B2)) - 1,191$</p>	Total biomassa karbon mangrove di daerah pesisir Demak berkisar antara 2,9-44,74 ton. Penelitian ini menyimpulkan bahwa saluran Band-2 dengan Band-3 untuk data Quickbird dan GeoEye, Band-1 dengan 2 untuk data ALOS sebagai tanda spektral pigmen klorofil mangrove dengan panjang gelombang 0,5-0,6 μ m sebagai yang terbaik untuk algoritma karbon bakau



No	Referensi	Citra yang dipergunakan	Tujuan	Metode/Model Estimasi Stok Karbon	Hasil
14	Dabrowska-Zielinska <i>et al.</i> , (2016)	Sentinel 1	Mengetahui laju spasial fluks CO ₂ (<i>Net Ecosystem Exchange</i>) dengan menggunakan data Sentinel-1 pada tutupan lahan	Kayu ($R^2=0,57, Std=0,75$): $NEE = -42,85 - 4,25 \times \sigma \cdot S1VH + 2,71 \times \sigma \cdot S1VV$ Sedge-moss ($R^2=0,58, Std=2,02$): $NEE = -7,22 + 1,42 \times \sigma \cdot S1VH - 2,74 \times \sigma \cdot S1VV$ Sedges ($R^2=0,51, Std=1,57$): $NEE = -2,28 - 0,86 \times \sigma \cdot S1VH + 1,08 \times \sigma \cdot S1VV$ Grass-herbs ($R^2=0,51, Std=2,75$): $NEE = 27,75 + 1,87 \times \sigma \cdot S1VH - 0,65 \times \sigma \cdot S1VV$ Grass ($R^2=0,55, Std=3,07$): $NEE = 11,22 + 2,34 \times \sigma \cdot S1VH + 2,72 \times \sigma \cdot S1VV$	Studi ini menunjukkan pentingnya kemampuan data microwave Sentinel-1 untuk menghitung kelembaban tanah dan memperkirakan NEE dengan kondisi akuisisi cuaca



dan spektral. Sensor juga ada yang konfigurasi tunggal dan beberapa sensor, penginderaan aktif dan pasif (Toth & Józkow, 2016). Berbagai panjang gelombang yang dipakai dalam sensor citra satelit dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Spektrum elektromagnetik band-band/saluran pada satelit penginderaan jauh (Toth & Józkow, 2016)

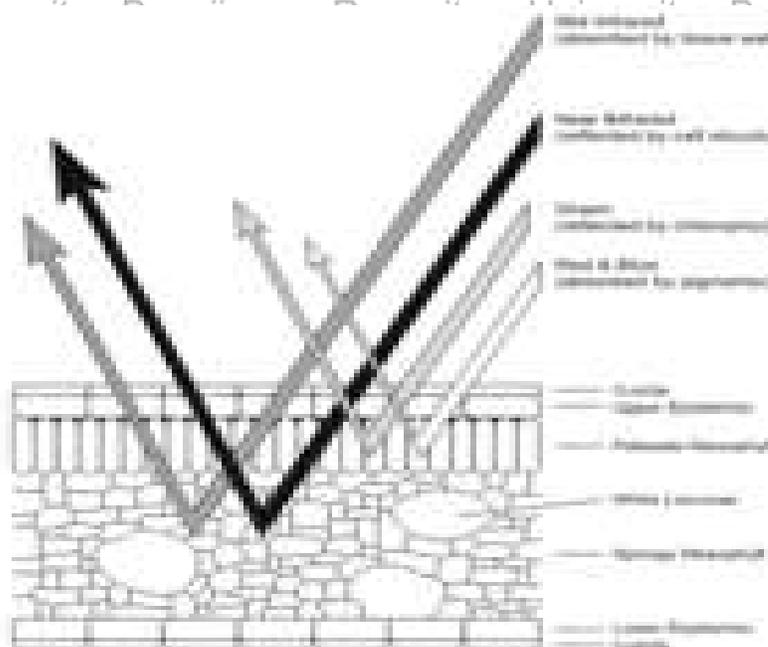
2.8.1. Konsep Penginderaan jauh dalam Pemetaan Vegetasi

Pemetaan vegetasi menyajikan informasi berharga untuk memahami lingkungan alam dan buatan manusia melalui mengukur tutupan vegetasi dari skala lokal sampai global pada waktu tertentu atau selama periode terus menerus. Hal ini penting untuk mendapatkan tutupan vegetasi dalam rangka untuk memulai program perlindungan dan pemulihan vegetasi. Ekstraksi vegetasi dari citra penginderaan jauh adalah proses penggalian informasi vegetasi dengan interpretasi citra satelit berdasarkan pada unsur-unsur interpretasi seperti warna gambar, tekstur, nada, pola dan informasi asosiasi, dan lainnya. Berbagai metode telah dikembangkan untuk melakukan hal ini (Xie *et al.*, 2008).

Prinsip karakteristik spektral vegetasi air yang sama dengan vegetasi darat. Pada tingkat daun, keberadaan dan konsentrasi pigmen daun menentukan respon spektrum, morfologi daun dan kandungan air merupakan faktor utama yang berpengaruh pada panjang gelombang inframerah (Gambar 18). Pada



tingkat individu faktor biofisik seperti distribusi daun, kerapatan daun, orientasi, dan struktur kanopi keseluruhan penting. Kanopi bercabang dan tanaman berdaun lebar memiliki area reflektif yang lebih efektif (Williams *et al.*, 2003). Secara umum biomassa tanaman dan kepadatannya merupakan variabel penting. Meskipun respon spektral vegetasi air menyerupai vegetasi terestrial, kondisi terendam atau banjir menjadi faktor yang mengubah karakteristik spektral secara keseluruhan (Silva *et al.*, 2008).



Gambar 18. Interaksi radiasi daun pada tingkat mikroskopis dengan panjang gelombang tertentu. Ketebalan panah sebanding dengan besarnya fluks radiasi (Silva *et al.*, 2008)

Prinsip karakteristik spektral vegetasi air yang sama dengan vegetasi darat. Pada tingkat daun, keberadaan dan konsentrasi pigmen daun menentukan respon spektrum, morfologi daun dan kandungan air merupakan faktor utama yang berpengaruh pada panjang gelombang inframerah (Gambar 18). Pada tingkat individu faktor biofisik seperti distribusi daun, kerapatan daun, orientasi, dan struktur kanopi keseluruhan penting. Kanopi bercabang dan tanaman berdaun lebar memiliki area reflektif yang lebih efektif (Williams *et al.*, 2003).



Secara umum biomassa tanaman dan kepadatannya merupakan variabel penting. Meskipun respon spektral vegetasi air menyerupai vegetasi terestrial, kondisi terendam atau banjir menjadi faktor yang mengubah karakteristik spektral secara keseluruhan (Silva *et al.*, 2008).

Pemilahan citra satelit yang akan digunakan dalam proses klasifikasi vegetasi harus dipastikan bahwa citra tersebut sesuai dengan cakupan kawasan yang dikaji, serta memperhatikan resolusi yang tepat baik temporal maupun spasial. Beberapa hal yang diperhatikan dalam memilih citra adalah: (1) Citra tidak boleh berumur lebih dari 12 bulan dan harus memiliki resolusi setidaknya 30 meter. (2) Data harus memiliki kualitas yang memadai untuk analisis, dengan penutupan awan kurang dari 5% dalam batas area kajian, tanpa atau dengan kabut yang minimal dan terlokalisir. (3) Ketersediaan saluran (band) spektral hijau, merah, inframerah dekat inframerah menengah yang berperan dalam penentuan tutupan vegetasi (Houghton, 2005).

2.8.2. Indeks Vegetasi

Sifat vegetasi sering diukur dengan mengkonversi spektrum reflektansi menjadi sebuah indeks nilai tunggal atau indeks vegetasi. Sifat vegetasi diukur menjadi tiga kategori utama: (1) struktur; (2) biokimia; dan (3) fisiologi tanaman/stres. Kategori struktural termasuk penutup pecahan, biomassa daun hijau, indeks luas daun, biomassa, dan fraksi diserap fotosintesis radiasi aktif. Mayoritas indeks dikembangkan untuk analisis struktural dirumuskan untuk sistem saluran yang lebar sampai sempit, hiperspektral. Sifat biokimia termasuk air, pigmen (klorofil, karoten, antosianin), senyawa kaya nitrogen lainnya (misalnya protein), dan bahan tanaman struktural (lignin dan selulosa). Indeks fisiologis dan stres mengukur perubahan yang disebabkan oleh perubahan stres yang disebabkan bagian xanthopil, perubahan kadar klorofil, fluoresensi, atau



perubahan kelembaban daun. Indeks umum, biokimia dan fisiologis/stres dirumuskan menggunakan laboratorium atau instrumen lapangan (≤ 10 nm spektral sampling) dan ditargetkan pada fitur spektral yang sangat halus (Roberts *et al.*, 2012). Macam algoritma indeks vegetasi dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Daftar vegetasi indeks hyperspectral (Roberts *et al.*, 2012)

Indeks	Persamaan	Sumber
Struktur		
SR (<i>simple ratio</i>)	R_{NIR}/R_{red}	(Jordan, 1969)
EVI (<i>environmental vegetation index</i>)	R_{IR}/R_{red}	(Birth & McVey, 1968; Thenkabail, 2016)
RVI (<i>ratio Vegetation index</i>)	R_{NIR}/R_{red}	(Broge & Leblanc, 2001)
NDVI (<i>normalized difference vegetation index</i>)	$(R_{NIR}-R_{red})/(R_{NIR}+R_{red})$	(Pettoirelli <i>et al.</i> , 2011; Gitelson & Merzlyak, 1997)
GNDVI (<i>Green normalized difference Vegetation index</i>)	$(R_{NIR}-R_{green})/(R_{NIR}+R_{green})$	(Gitelson & Merzlyak, 1997)
GARI (<i>Green Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>)	$(R_{NIR}-(R_{green} - (R_{blue}-R_{red}))) / (R_{NIR}-(R_{green} + (R_{blue}-R_{red})))$	(Gopal & Woodcock, 1996)
PVI (<i>perpendicular vegetation index</i>)	$\sqrt{(R_{Red\ soil} - R_{Red\ veg})^2 + (R_{IR\ soil} - R_{IR\ veg})^2}$	(Richardson & Wiegand, 1977; Thenkabail, 2016)
MSR (<i>Modified Simple Ratio</i>)	$((R_{NIR}/R_{red})-1) / ((R_{NIR}/R_{red})+1)^{0.5}$	(Chen, 1996; Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
MTV (<i>Modified Triangular Vegetation Index1</i>)	$1,2*(1,2*(R_{800}-R_{550})-2,5*(R_{670}+R_{550}))$	(Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
MTV (<i>Modified Triangular Vegetation Index2</i>)	$\frac{1,5 * (1,2 * (R_{800} - R_{550}) - 2,5 * (R_{670} + R_{550}))}{\sqrt{(2 * R_{800} + 1)^2 - (6 * R_{800} - 5 * \sqrt{R_{670}}) - 0,5}}$	(Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
EVI (<i>enhanced vegetation index-MODIS</i>)	$2,5*(R_{NIR}-R_{red}) / (R_{NIR}+6*R_{red}-7,5*R_{blue}+1)$	(Huete <i>et al.</i> , 1997)
EVI2	$2,5*(R_{NIR}-R_{red}) / (R_{NIR}+2,4*(R_{red})+1)$	(Jiang <i>et al.</i> , 2008)
ARVI (<i>atmospherically resistant vegetation index</i>)	$((R_{NIR}-(R_{red}*\gamma*(R_{blue}-R_{red}))) / (R_{NIR}+(R_{red}*\gamma*(R_{blue}-R_{red})))$	(Kaufman & Tanré, 1992)
SAVI (<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)	$(1+L)*(R_{805}-R_{710})/(R_{805}+R_{710}+L)$ atau $(1+0,2)*R_{805}-R_{710}/((R_{805}+R_{710})+0,2)$ L = <i>soil correction factor</i> (faktor koreksi yang nilainya berkisar dari 0 (tutupan vegetasi tinggi) dan 1 (vegetasi rendah))	(Huete, 1988; Roujean & Breon, 1995; Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
OSAVI (<i>Optimized SAVI</i>)	$(1+0,16)*(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0,16)$ atau $(1+0,16)*(R_{805}-R_{710})/(R_{805}+R_{710}+0,16)$	(Rondeaux <i>et al.</i> , 1996)



Indeks	Persamaan	Sumber
MSAVI(modified SAVI)	$\frac{1}{2} [2 * R_{800} + 1 - \sqrt{(2 * R_{800} + 1)^2 - 8 * (R_{800} - R_{670})}]$	(Qi <i>et al.</i> , 1994)
TVI (<i>Triangular Vegetation Index</i>)	$0,5 * (120 * (R_{750} - R_{550}) - 200 * (R_{670} - R_{550}))$	(Broge & Leblanc, 2001)
RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index)	$(R_{800} - R_{670}) / (\text{SQRT}(R_{800} + R_{670}))$	(Roujean & Breon, 1995)
VARI (<i>Vegetation Atmospherically Resistant Index</i>)	$(R_{\text{green}} - R_{\text{red}}) / (R_{\text{green}} + R_{\text{red}} - R_{\text{blue}})$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)
VI <i>green</i>	$(R_{\text{green}} - R_{\text{red}}) / (R_{\text{green}} + R_{\text{red}})$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)
NDRE (<i>Normalized Difference Red-Edge Index</i>)	$(R_{805} - R_{710}) / (R_{805} + R_{710})$	(Eitel <i>et al.</i> , 2011; Ramoelo <i>et al.</i> , 2015)
ZM (Zarco and Miller)	$R_{750} - R_{710}$	(Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2001)
RGI (<i>Red/Green Index</i>)	R_{690} / R_{550}	(Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2005)
BGI (<i>Blue/Green Index</i>)	R_{400} / R_{550}	
BRI (<i>Blue/Red Index</i>)	R_{400} / R_{690}	
DVI (<i>Difference Vegetation Index</i>)	$R_{805} - R_{710}$	(Jordan, 1969)
VOG (<i>Vogelmann Indices</i>)	$\text{VOG1} = R_{746} / R_{720}$ $\text{VOG2} = (R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{726})$	(Vogelmann <i>et al.</i> , 1993)
GM (<i>Gitelson and Merzlyak</i>)	$\text{GM1} = R_{750} / R_{550}$ $\text{GM2} = R_{750} / R_{700}$	(Gitelson & Merzlyak, 1997)
CUR (<i>Curvature Index</i>)	$(R_{675} * R_{690}) / (R_{683}^2)$	(Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2000)
Biokimia - Pigmen		
SRPI (<i>Simple Ratio Pigment Index</i>)	R_{475} / R_{710}	(Peñuelas <i>et al.</i> , 1995)
NPCI (<i>Normalized Pigment Chlorophyll Index</i>)	$(R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	(Peñuelas <i>et al.</i> , 1994)
NPQI (<i>Normalized Pheophytinization Index</i>)	$(R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$	(Barnes <i>et al.</i> , 1992)
SIPI (<i>structurally insensitive pigment index</i>)	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} + R_{680})$	(Sims & Gamon, 2002)
PSSR (<i>pigment specific spectral ratio</i>)	$(R_{800} - R_{675}) / (R_{800} + R_{650})$	(Blackburn, 1998)
PSND (<i>pigment sensitive normalized difference</i>)	$((R_{800} - R_{675}) / (R_{800} + R_{675})) / ((R_{800} - R_{650}) / (R_{800} + R_{650}))$	
PSRI (<i>plant senescence reflectance index</i>)	$(R_{680} - R_{500}) / R_{750}$	(Sims & Gamon, 2002)
PRI (<i>photochemical reflectance index</i>)	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	
PPR (<i>plant pigment</i>)	$(R_{550} - R_{450}) / (R_{550} + R_{450})$	(Metternicht, 2003)



Indeks	Persamaan	Sumber
ratio)		
Klorofil		
CARI (<i>chlorophyll absorption in relectance index</i>)	$((R_{700}-R_{670})-0,2/(R_{700}+R_{550}))$	(Kim <i>et al.</i> , 1994)
MCARI (<i>modified CARI</i>)	$((R_{700}-R_{670})-0,2*(R_{700}-R_{550}))*(R_{700}/R_{670})$	(Daughtry, 2000; Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
MCARI ₁	$1,2*(2,5*(R_{800}-R_{670})-1,3*(R_{800}+R_{550}))$	(Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
MCARI ₂	$1,5 * ((R_{800} - R_{670}) - 1,3 * (R_{800} - R_{670}))$	(Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
$C_{i_{red\ edge}}$ (<i>chlorophyll red-edge index</i>)	$\frac{\sqrt{(2 * R_{800} + 1)^2 - (6 * R_{800} - 5 * \sqrt{R_{670}})} - 0,5}{R_{NIR}-R_{red\ edge} - 1}$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2006)
MERIS (<i>Terrestrial Chlorophyll Index</i>)	$(R_{805}-R_{710})/(R_{710}+R_{657})$	(Ramoelo <i>et al.</i> , 2015)
MTCI (<i>MERIS terrestrial chlorophyll index</i>)	$(R_{754}-R_{709})/(R_{709}+R_{681})$	(Dash & Curran, 2007)
Anthocyanins		
mARI (<i>modified ARI</i>)	$(1/R_{green}) - (1/R_{red\ edge}) * R_{NIR}$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2006)
PGRI (<i>model include the red/green ratio</i>)	R_{red}/R_{green}	(Gamon & Surfus, 1999)
ACI (<i>anthocyanin content index</i>)	R_{green}/R_{NIR}	(Van Den Berg & Perkins, 2005)
Carotenoids		
CRI1 (<i>carotenoid relectance index 1</i>)	$(1/R_{510}) - (1/R_{550})$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)
CRI2 (<i>carotenoid relectance index 2</i>)	$(1/R_{510}) - (1/R_{700})$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)
Water		
NDII (<i>normalized difference infrared index</i>)	$(R_{NIR}-R_{SWIR})/(R_{NIR}+R_{SWIR})$	(Hunt Jr & Rock, 1989)
WBI (<i>water band Index</i>)	$R_{900}-R_{970}$	(Penuelas <i>et al.</i> , 1997)
MSI (<i>moisture stress index</i>)	$R_{SWIR}-R_{NIR}$	(Rock <i>et al.</i> , 1986)
Lignin dan selulosa / residu		
CAI (<i>cellulose absorption index</i>)	$100*(0,5*(R_{2031}+R_{2211})-R_{2101})$	(Daughtry, 2001)
NDLI (<i>normalized difference lignin index</i>)	$(\log(1/R_{1754})-\log(1/R_{1680})) / (\log(1/R_{1754})+\log(1/R_{1680}))$	(Serrano <i>et al.</i> , 2002)
Nitrogen		
NDNI (<i>normalized difference nitrogen index</i>)	$(\log(1/R_{1510})-\log(1/R_{1680})) / (\log(1/R_{1510})+\log(1/R_{1680}))$	(Serrano <i>et al.</i> , 2002)
NRI (<i>nitrogen reflectance index</i>)	$(R_{NIR}/R_{green}) / (R_{NIR}/R_{green})$	(Diker & Bausch, 2003)
efisiensi penggunaan cahaya		
PGRI dan	R_{red}/R_{green}	(Gamon & Surfus, 1999; Sims &
SIPI	$(R_{800}-R_{445}) / (R_{800}+R_{680})$	



Indeks	Persamaan	Sumber
PRI (<i>photochemical relectance index</i>)	$(R_{531}-R_{570}) / (R_{531}+R_{570})$	Gamon, 2002) (Gamon <i>et al.</i> , 1997; Suárez <i>et al.</i> , 2009)
Stess MSI (<i>moisture stress index</i>)	$R_{SWIR}-R_{NIR}$	(Rock <i>et al.</i> , 1986)
REP	$L(\text{max first derivative: } 680-750 \text{ nm})$	(Horler <i>et al.</i> , 1983)

2.8.3. Penginderaan Jauh Satelit Sentinel-2

Global Monitoring for Environment and Security (GMES) merupakan inisiatif bersama *European Commission* (EC) dan *European Space Agency* (ESA) membangun kapasitas untuk Eropa penyediaan dan penggunaan informasi operasional monitoring bagi lingkungan dan keamanan. Peran ESA dalam GMES adalah untuk memberikan pengembangan sistem ruang dan tanah. Misi GMES Sentinel-2 memberikan kontinuitas layanan pengamatan optik multi-spektral resolusi tinggi di atas permukaan bumi. Tujuan misi utama Sentinel-2 adalah: (1) Untuk memperoleh data global citra resolusi tinggi multispektral dengan frekuensi kunjungan ulang yang tinggi, (2) untuk memberikan kontinuitas peningkatan citra multispektral yang disediakan oleh satelit SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*), dan (3) untuk memperoleh data pengamatan untuk generasi berikutnya dari produk-produk operasional seperti peta tutupan lahan, peta deteksi perubahan lahan, dan variabel geofisika. Sentinel-2 akan berkontribusi terhadap pemantauan lahan, tanggap darurat, dan jasa keamanan. Menampilkan *Multi Spectral Instrument* (MSI) dengan 13 band spektral dari inframerah dekat dengan inframerah gelombang pendek. Bentuk satelit sentinel-2 dapat dilihat pada Gambar 19 (Drusch *et al.*, 2012)



Gambar 19. Satelit Sentinel-2 (Drusch et al., 2012)

Resolusi spasial bervariasi dari 10m-60m tergantung pada band spektral.

Spesifikasi misi satelit Sentinel-2 adalah : Waktu Misi selama 15 tahun; 2 satelit;

Nominal orbit satelit orbit selama 7,25 tahun habis pakai dan untuk tambahan 5 tahun; Sistem orbit Sunsinkron ketinggian 786 km; waktu orbit <5 hari; kualitas

produk berkualitas Level 0,1; stasiun bumi di Kiruna, Svalbard, Maspalomas,

Prince Albert, ditambah stasiun pengguna lokal; Akurasi < 20m; luas area cover

290 km; pencitraan maksimum 32 menit/100 menit orbit; berat satelit 1.225 kg

(dengan 70 kg marjin); dimensi satelit 3390mm x 1630mm x 2350mm (Drusch et

al., 2012).

Beberapa penelitian kebanyakan citra ini dipadukan dengan citra lain.

Dalam kasus dua sensor dapat dikombinasikan dengan baik. Namun, beberapa

masalah timbul mengenai band inframerah dekat ketika Sentinel-2 yang

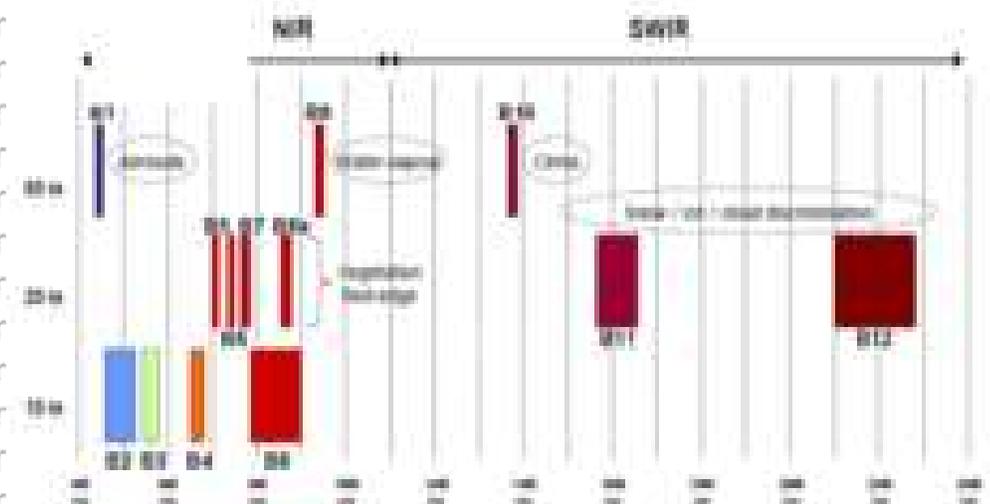
digabungkan dengan Landsat 8 (Mandanici & Bitelli, 2016; Storey et al., 2016).

Beberapa kasus citra Sentinel-2 juga dipergunakan dengan citra yang

mempunyai resolusi tinggi untuk estimasi indeks vegetasi (Ng et al., 2017).

Tujuan Sentinel-2 untuk layanan seperti: perubahan tutupan lahan, manajemen

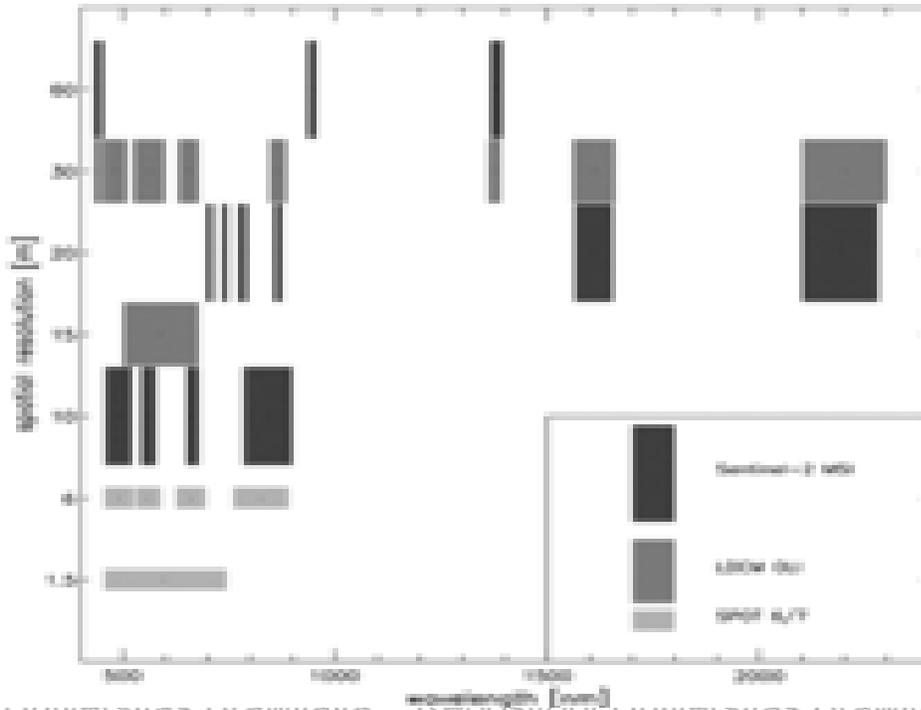
risiko bencana (banjir dan kebakaran hutan, penurunan dan lahan), manajemen air dan perlindungan tanah, ketahanan pangan/sistem peringatan dini, pemantauan hutan, pemetaan terestrial untuk bantuan kemanusiaan. Resolusi spektral dan spasial citra sentinel-2 dapat dilihat pada Gambar 20 (Gatti *et al.*, 2016). Panjang gelombang pada masing-masing band pada citra sentinel-2 dapat dilihat pada Tabel 9. Sedangkan perbandingan resolusi spektral dan spasial citra sentinel-2 dengan citra Landsat 8/LDCM dan SPOT 6/7 dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Resolusi Spektral Band, dan Resolusi Spasial Sentinel-2 (Gatti, Bertolini, & Acs, 2016)

Tabel 9. Resolusi spektral dan spasial pada citra Sentinel-2 (Richter *et al.*, 2011)

Band	Centre wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Spatial resolution (m)
1	443	20	10
2	490	20	10
3	660	20	10
4	655	20	10
5	842	20	10
6	1240	20	10
7	1640	20	10
8	2130	20	10
9	2185	20	10
10	2360	20	10



Gambar 21. Band spektral dibandingkan resolusi spasial untuk Sentinel-2 MSI, SPOT-6/7 dan LDCM OLI instrumen. Luas area cover 290 km (MSI), 185 km (LDCM), dan 60 km (SPOT)(Drusch et al., 2012)

2.8.4. Penginderaan Jauh Satelit Landsat

Satelit Landsat telah menyediakan produk citra multispektral selama 30 tahun lebih, dan sejarah dan keandalannya yang panjang menjadikannya sumber populer untuk mendokumentasikan perubahan tutupan lahan dan penggunaan dari waktu ke waktu. Data ini tersedia untuk umum di Pusat Data Sistem Pengamatan Sumber Daya Bumi dari US Geological Survey, dan akan memberikan informasi dasar untuk analisis penutupan lahan masa lalu dan pendeteksian perubahan tutupan lahan (Turner et al., 2003). Pencapaian utama Landsat adalah mengakuisisi arsip data penginderaan jauh lebih dari 40 tahun, yang telah disampaikan melalui peluncuran satelit Landsat berikutnya ditambah dengan keinginan untuk memastikan kesinambungan data antara berbagai misi. Landsat didirikan oleh National Aeronautics and Space Administration (NASA),



kemudian dipindahkan ke sektor swasta di bawah pengelolaan National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) pada awal tahun 1980-an, dan, setelah tantangan operasional, kembali ke Pemerintah AS kontrol pada tahun 1992. Ada juga masalah teknis, terutama kegagalan Landsat 6 untuk mencapai orbit yang ditentukan dan Landsat 7 mengalami kegagalan parsial pada tahun 2003 (Lavender & Lavender, 2015).

Seri Landsat hingga saat ini sudah ada 8 generasi (Tabel 10 dan 11), dan yang terakhir LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) yang orbit pada Februari 2013. Mulai dari Landsat 1 hingga LDCM Landsat mengalami perubahan desain sensor. Landsat 1 dan 2 memuat 2, yaitu sensor RBV (*Return Beam Vidicon*) dan MSS (*Multi Spectral Scanner*). Landsat 3 masih memuat ketiga macam sensor tersebut, tetapi untuk saluran RBV menjadi 1 saluran tunggal beresolusi spasial 40 meter. Landsat 4 dan 5 memuat dua sensor, tetapi mengganti RBV dengan TM (*Thematic Mapper*). Landsat 6 tahun 1993 tetapi misi ini gagal karena sesaat setelah diluncurkan satelit Landsat 6 hilang (tanggal 5 Oktober 1993). Generasi selanjutnya Landsat 7 memiliki sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*), dengan resolusi 30 m. Sensor ETM+ merupakan sensor TM yang dilengkapi dengan satu saluran tambahan, berupa saluran pankromatik dengan resolusi spasial 15 m dan saluran thermal yang telah disempurnakan. Saluran termal mempunyai resolusi spasial 60 m. Landsat 7 diluncurkan pada tanggal 15 April 1999. Pada tanggal 11 februari 20013 jam 10.02 a.m. PST di Atlas V-401, Vandenberg Air Force Base California NASA meluncurkan satelit generasi 8 satelit Landsat diberi nama Landsat Data Continuity Mission (LDCM). Satelit ini mempunyai 2 sensor, yaitu OLI (*Operational Land Imager*) dengan 9 saluran (*visible, NIR, SWIR*) dan resolusi spasial 30 meter kecuali saluran 8 pankromatik dengan spasial 15



meter. Sensor kedua TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) dengan 2 saluran (TIR) dengan resolusi spasial 100 m. Lebih jelasnya dapat dilihat pada (USGS, (2016); USGS, (2011)).

Tabel 10. Informasi status operasional seri Landsat

Satelit	Peluncuran	Tidak Aktif	Jenis Sensor
Landsat 1	23 Juli 1972	6 Januari 1978	MSS dan RBV
Landsat 2	22 Januari 1975	25 Februari 1982	MSS dan RBV
Landsat 3	5 Maret 1978	31 Maret 1983	MSS dan RBV1
Landsat 4	16 Juli 1982	*	TM dan MSS
Landsat 5	1 Maret 1984	**	TM dan MSS
Landsat 6	5 Oktober 1993	Gagal orbit	ETM
Landsat 7	15 April 1999		ETM+
LDCM	11 Februari 2013		OLI dan TIRS

* = Data transmisi TM gagal pada Agustus 1993

** = Masih beroperasi
(Chuvieco *et al.*, 2010)

Tabel 11. Spesifikasi sensor dan julat spektral Landsat 1-LDCM

Sensor	Misi Sate- lit	Band	Panjang Gelombang (μm)	IFOV (m)	Dynamic Range (bits)	Sumber	
RBV ^m	1,2	1	0,475 – 0,575 (biru)	79 x 79		(USGS, 2011)	
		2	0,580 – 0,680 (merah)	79 x 79			
		3	0,689 – 0,830 (inframerah dekat)	79 x 79			
RBV ^p	3		0,505 – 0,750 (pankromatik)	40 x 40			
MSS	1 – 5	4 ^a	0,5 – 0,6 (hijau)	79 x 79	7		
		5	0,6 – 0,7 (merah)	79 x 79	7		
		6	0,7 – 0,8 (inframerah dekat)	79 x 79	7		
		7	0,8 – 1,1 (inframerah dekat)	79 x 79	6		
		8 ^b	10,4 – 12,6 (termal)	237x 237			
		3					
		4					
TM	4,5	1	0,45 – 0,52 (biru)	30 x 30	8	(USGS, 2011)	
		2	0,52 – 0,60 (hijau)	30 x 30	8		
		3	0,63 – 0,69 (merah)	30 x 30	8		
		4	0,76 – 0,90 (inframerah dekat)	30 x 30	8		
		5	1,55 – 1,75 (inframerah tengah)	30 x 30	8		
		7 ^c	2,08 – 2,35 (inframerah tengah)	30 x 30	8		
		6	10,4 – 12,5 (termal)	120x120	8		
ETM+	6	1	0,450 – 0,515 (biru)	30 x 30	8	(USGS, 2011)	
		2	0,525 – 0,605 (hijau)	30 x 30	8		
		3	0,630 – 0,690 (merah)	30 x 30	8		
		4	0,775 – 0,900 (inframerah dekat)	30 x 30	8		
		5	1,550 – 1,750 (inframerah tengah)	30 x 30	8		

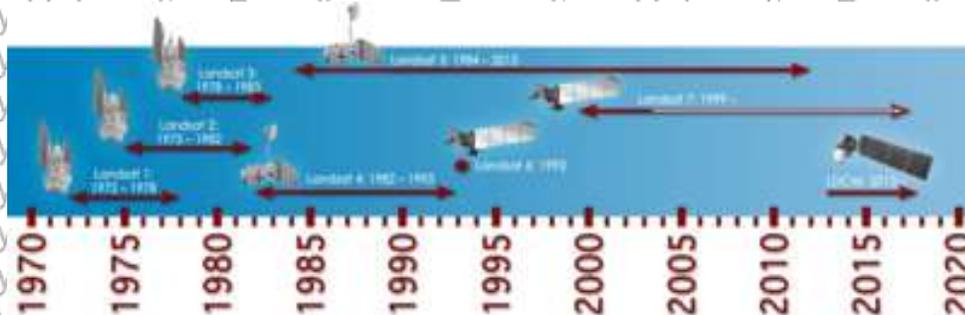


Sensor	Misi Sate- lit	Band	Panjang Gelombang (μm)	IFOV (m)	Dynamic Range (bits)	Sumber
		7	2,090 – 2,350 (inframerah tengah)	30 x 30	8	
		6	10,40 – 12,50 (termal)	60 x 60	8	
		7	Pan 0,520 – 0,900 (pankromatik)	15x15	8	
OLI	LDC M	1	0,43–0,45 (coastal blue)	30x30	12	(USGS, 2016)
		2	0,45–0,51 (blue)	30x30	12	
		3	0,53–0,59 (green)	30x30	12	
		4	0,64–0,67 (red)	30x30	12	
		5	0,85–0,88 (NIR)	30x30	12	
		6	1,57–1,65 (SWIR-1)	30x30	12	
		7	2,11–2,29 (SWIR-2)	30x30	12	
		8	0,50–0,68 (panchromatic)	15x15	12	
		9	1,36–1,38 (cirrus)	30x30	12	
TIRS	LDC M	10	10,60–11,19 (TIR-1)	100x100	12	
		11	11,50–12,51 (TIR-2)	100x100	12	

^a MSS : band 4 sampai band 7 dimiliki oleh MSS. Saluran 1-4 dari Landsat 4 dan seterusnya. IFOV = 81,5; 82,5m untuk Landsat 4,5

^b untuk MSS band 8 hanya digunakan di dalam Landsat 3

^c TM saluran 7 digunakan untuk pemetaan hidrotermal (Lavender & Lavender, 2015)



Gambar 22. Generasi satelit landsat 1-8 (LDCM) (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/a-landsat-timeline/>)

Integrasi teknologi penginderaan jarak jauh dengan memanfaatkan citra landsat dan GIS telah diterapkan secara luas dan telah diakui sebagai alat yang efektif dalam penelitian yang berkaitan dengan perkotaan atau tutupan lahan lain (Weng, 2010). Salah satu pemanfaatan citra Landsat multi temporal adalah untuk pemetaan hutan mangrove (Abdul *et al.*, 2015; Fatoyinbo *et al.*, 2008; Haryani, 2013; Green *et al.*, 1998; Franklin, 2001). Lebih jauh lagi, citra ini juga dimanfaatkan untuk perhitungan stok karbon mangrove (Hamdan *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2007).



2.9. Pemanfaatan Penginderaan Jauh untuk Pemetaan Mangrove

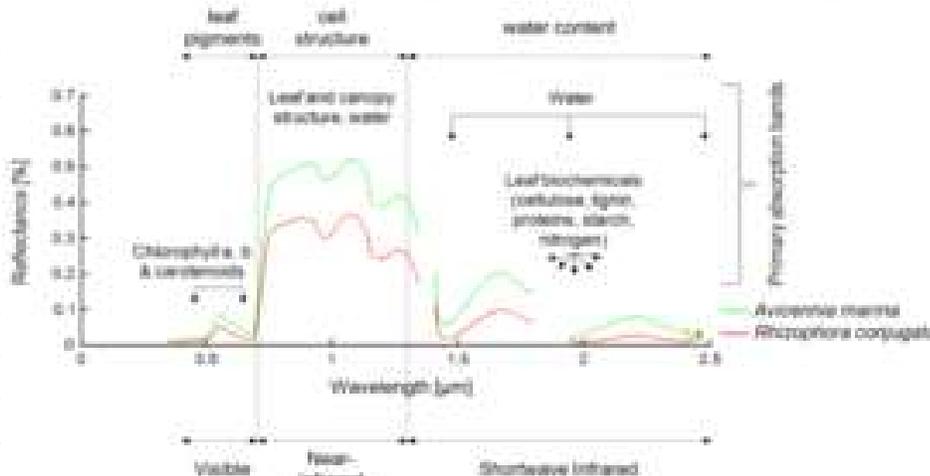
Ekosistem bakau memiliki relevansi yang luar biasa terhadap kondisi ekologis dan ekonomis, ada permintaan mendesak untuk tindakan konservasi dan restorasi. Mengambil informasi terbaru berkenaan dengan luas dan kondisi ekosistem mangrove merupakan hal penting untuk manajemen dan proses kebijakan dan pengambilan keputusan. Habitat bakau yang khas terendam dan sering berada di daerah tidak dapat diakses, akibatnya observasi lapangan dan survei sangat memakan waktu dan biaya. Untuk mengatasi masalah ini, dalam skala besar dan jangka panjang, monitoring dan pemetaan yang hemat biaya diperlukan. Hal ini dapat diselesaikan menggunakan teknologi penginderaan jauh (Wang & Sousa, 2009; Kuenzer *et al.*, 2011)

Teknologi penginderaan jauh telah diterapkan dalam berbagai cara untuk pemetaan ekosistem mangrove. Beberapa aplikasi didokumentasikan termasuk pemetaan luas, mendeteksi spesies individu, dan memberikan perkiraan struktur dan parameter seperti luas daun, tinggi kanopi, dan biomassa. Karakterisasi ekosistem ini adalah untuk memantau dan mengevaluasi mangrove. Secara umum semua aplikasi penginderaan jauh dalam ekosistem bakau dapat mengidentifikasi sumber daya mangrove; mendeteksi; seleksi dan inventarisasi (Valiela *et al.*, 2001). Beberapa teknik yang telah digunakan untuk mendeteksi dan menggambarkan bakau adalah teknik klasifikasi *supervise* dan *unsupervise*, dan kadang-kadang kombinasi keduanya. Transformasi spektral seperti *principal components analysis* (PCA) atau *Tassel-Cap Transformation*, atau *indeks vegetasi spektral* seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Mensah, 2013).

Mangrove dapat dibedakan dari karakteristik tekstur dan spektral kanopi dan daun. Penampilan strukturalnya sebagian lebih homogen atau heterogen tergantung pada beberapa faktor, seperti komposisi spesies, pola distribusi,



bentuk pertumbuhan, kepadatan, dan tinggi. Nilai spektral dari suatu spesies dipengaruhi usia, vitalitas, dan fenologi dan karakteristik fisiologis (Blasco *et al.*, 1998). Perubahan iklim secara periodik yang mempengaruhi dinamika daun dan penuaan daun juga dapat berdampak pada respon spektral (Wang *et al.*, 2008). Perbedaan spektral yang disebabkan oleh komponen daun (garam, gula, air, protein, minyak, lignin, pati, dan selulosa, serta struktur daun) berinteraksi dengan radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang dekat dan inframerah pertengahan bekerja lebih baik. Selain itu, efek pasang surut dan jenis tanah mempengaruhi sinyal spektral komunitas tumbuhan (Blasco *et al.*, 1998; Kuenzer *et al.*, 2011). Perbedaan nilai pantulan/spektral pada jenis mangrove *Avicennia marina* dan *Rhizophora* dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Karakteristik spektral dan parameter yang mempengaruhi jenis mangrove *Avicennia marina* dan *Rhizophora* konjugat yang diukur dengan spektrometer lapangan di Ca Mau Province, Vietnam, Januari 2010. (Kuenzer *et al.*, 2011)

2.10. Teknologi Penginderaan Jauh Dalam Pendugaan Stok Karbon Mangrove

Mangrove dapat menyerap karbon lebih baik dari ekosistem darat karena kemampuannya untuk mengubur karbon dalam sedimen (Jennerjahn & Ittekkot, 2002). Estimasi biomassa mangrove dengan survei lapangan dikombinasikan dengan data penginderaan jauh adalah metode yang ideal dan dianggap praktis



(Heumann, 2011). Penginderaan jauh dikombinasikan dengan data survei lapangan seperti dbh (diameter setinggi dada), tinggi pohon dan persamaan alometrik untuk memperkirakan biomassa mangrove. Penilaian stok karbon dengan penginderaan jauh diharapkan dapat mengurangi metode destruktif atau kehancuran mangrove. Estimasi biomassa atau stok karbon mangrove menggunakan citra penginderaan jauh telah dilakukan dengan berbagai citra, seperti: Quickbird (Hirata et al., 2014), ALOS (Frananda et al., 2015), Landsat (Ishil & Tateda, 2004), RADARSAT (Li et al., 2007). Resolusi citra yang berbeda menghasilkan akurasi model yang berbeda. Pemetaan stok karbon oleh penginderaan jauh terlepas dari spesies/jenis vegetasi mangrove dapat menyebabkan kesalahan, karena spesies yang berbeda tergantung pada kerapatan kanopi berkorelasi dengan nilai karbon. Jenis mangrove yang berbeda menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam refleksi spektral dari spektrum elektromagnetik. Citra resolusi spasial tinggi memiliki kemampuan memetakan stok karbon lebih rinci pada tingkat spesies mangrove (Candra et al., 2016).

Penggunaan penginderaan jauh satelit untuk mengukur biomassa mangrove untuk penghitungan karbon telah menyebar luas karena dapat memberikan penilaian yang akurat, efisien, dan berulang. Data penginderaan jauh dapat menyediakan sarana yang berguna untuk mengukur stok karbon di hutan (Khairunnisa & Hasmadi, 2012). Beberapa indeks vegetasi seperti : Indeks vegetasi seperti DVI (*Difference Vegetation Index*), EVI (*Enhanced Vegetation Index*), dan MRE-SR (*Modified Red Edge-Simple Ratio*) dan data lapangan dimodelkan untuk memperkirakan stok karbon (Candra et al., 2016).



BAB III. KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1. Kerangka Konseptual

Akibat pembakaran bahan bakar fosil (bahan bakar minyak dan batu bara), perubahan alih fungsi hutan dan kebakaran hutan. Hal tersebut mengakibatkan meningkatnya kandungan karbondioksida di atmosfer. Mangrove sebagai hutan pesisir, mempunyai peran yang besar dalam penyerapan karbondioksida (CO_2) dari udara. Melalui proses fotosintesis dalam daun dan hasilnya disimpan dalam jaringan tumbuhan dalam bentuk karbohidrat, tumbuhan dapat mengurangi karbondioksida di atmosfer (CO_2). Hasil fotosintesis disimpan dalam biomassa. Biomassa mangrove disimpan dalam daun, batang, akar, serasah, kayu mati/pohon mati dan tanah yang merupakan kantong penyimpanan karbon. Mangrove menyimpan karbon empat kali lebih cepat dari hutan tropis. Bahan organik pada tanah mangrove yang tinggi menyebabkan penyimpanan karbon di bawah tanah lebih tinggi daripada di atas tanah. Melalui siklus hara dan respirasi CO_2 di lepaskan udara. Jika kondisi hutan terganggu akibat perubahan lahan akan berdampak signifikan terhadap supley CO_2 di atmosfer. Lebih jelasnya kerangka konseptual penelitian dapat dilihat pada Gambar 24.

Penelitian ini mencoba melakukan estimasi stok karbon mangrove dengan pendekatan pemodelan *hybrid* penginderaan jauh. Pendekatan penginderaan jauh yang dipergunakan adalah indeks vegetasi. Indeks vegetasi yang dipergunakan ada 24 macam, dari semua indeks vegetasi ini dicari indeks vegetasi mana yang paling akurat untuk menduga biomassa mangrove (Gambar 25). Biomassa mangrove (daun, batang, akar, pohon mati, kayu mati, tanah) dihitung dengan menggunakan metode alometrik (Gambar 26).

Pada penelitian ini mencari model terbaik untuk estimasi karbon mangrove dengan beberapa pemodelan, yaitu : Pemodelan estimasi karbon total



dengan indeks vegetasi (citra Sentinel-2 dan LDCM) dengan pendekatan regresi.

Pemodelan *Hybrid* : Pemodelan estimasi karbon mangrove dengan memisahkan

karbon biomassa dan karbon tanah. Pemodelan estimasi karbon biomassa

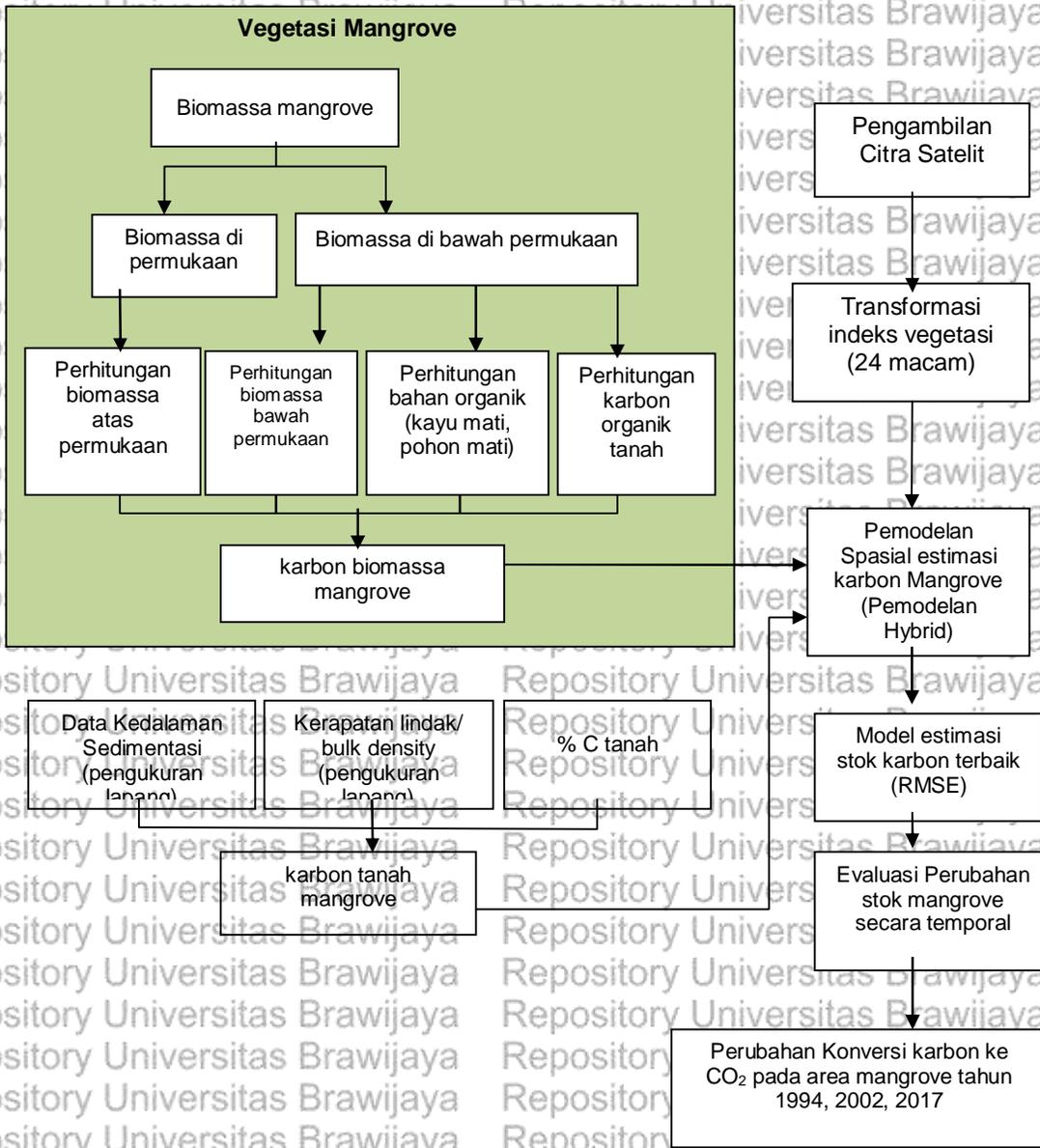
dengan regresi non linier. Pemodelan estimasi karbon tanah dengan: (a)

persamaan perhitungan karbon tanah, (b) model regresi non linier , (c) model

regresi berganda. Model terbaik dipergunakan untuk evaluasi perubahan stok

karbon mangrove temporal di Pulau Madura. Juga dilakukan konversi karbon ke

CO₂ pada area mangrove tahun 1994, 2002, 2017

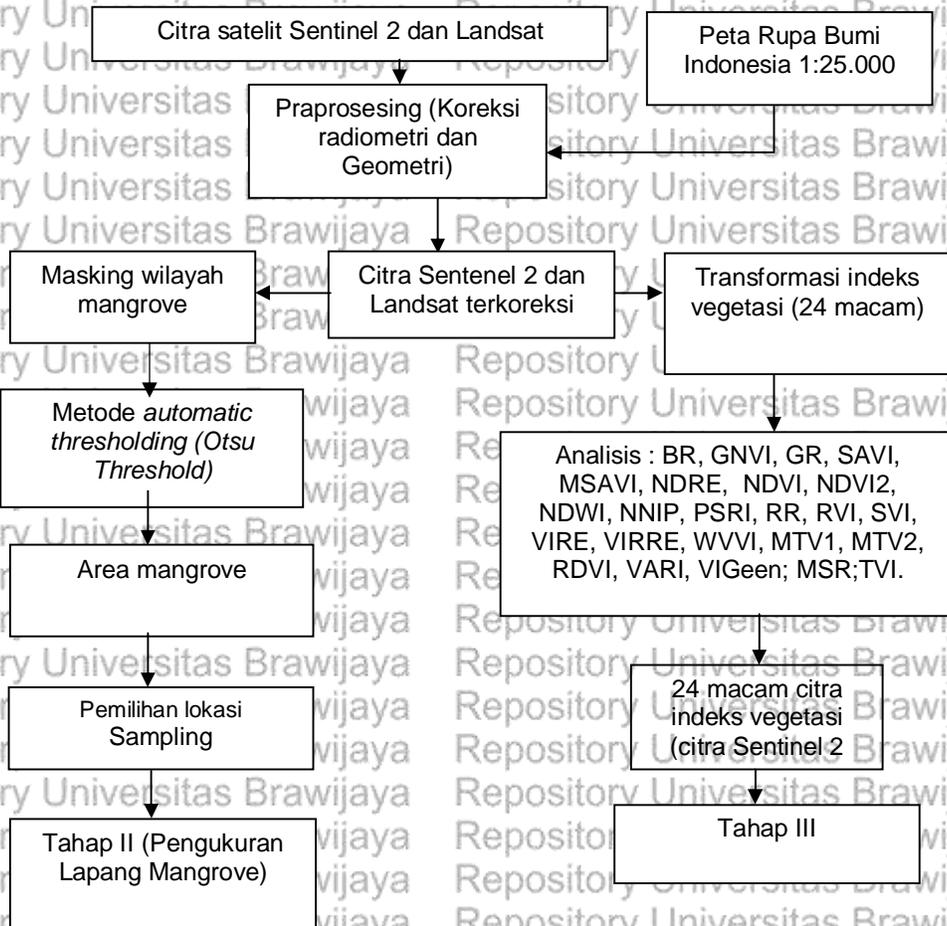


Gambar 24. Kerangka Konsep Penelitian



3.2. Kerangka Operasional

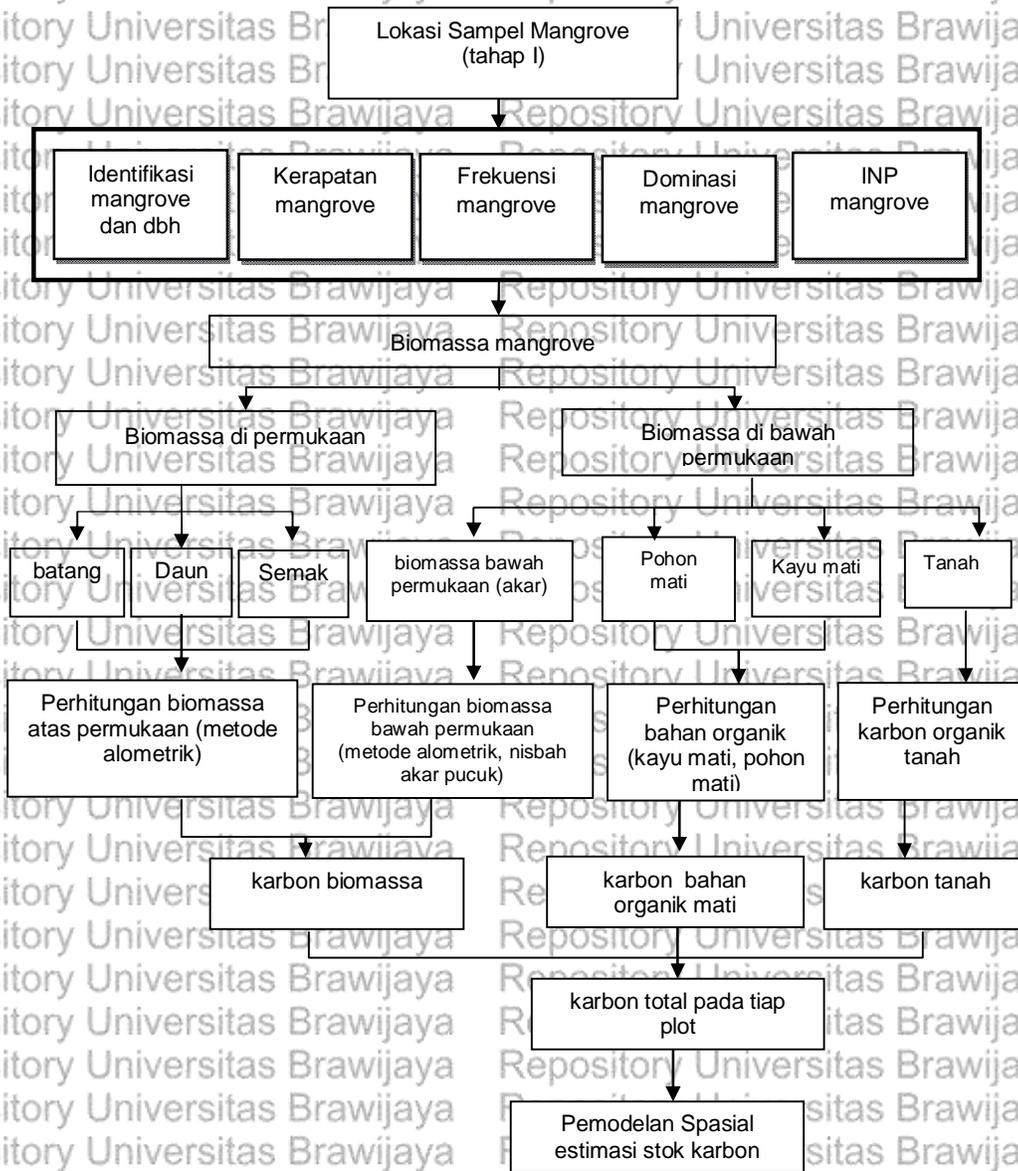
1) **Kerangka Operasional Tahap I** : Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode indeks vegetasi dan masking wilayah mangrove



Gambar 25. Kerangka Operasional Penelitian Tahap I.



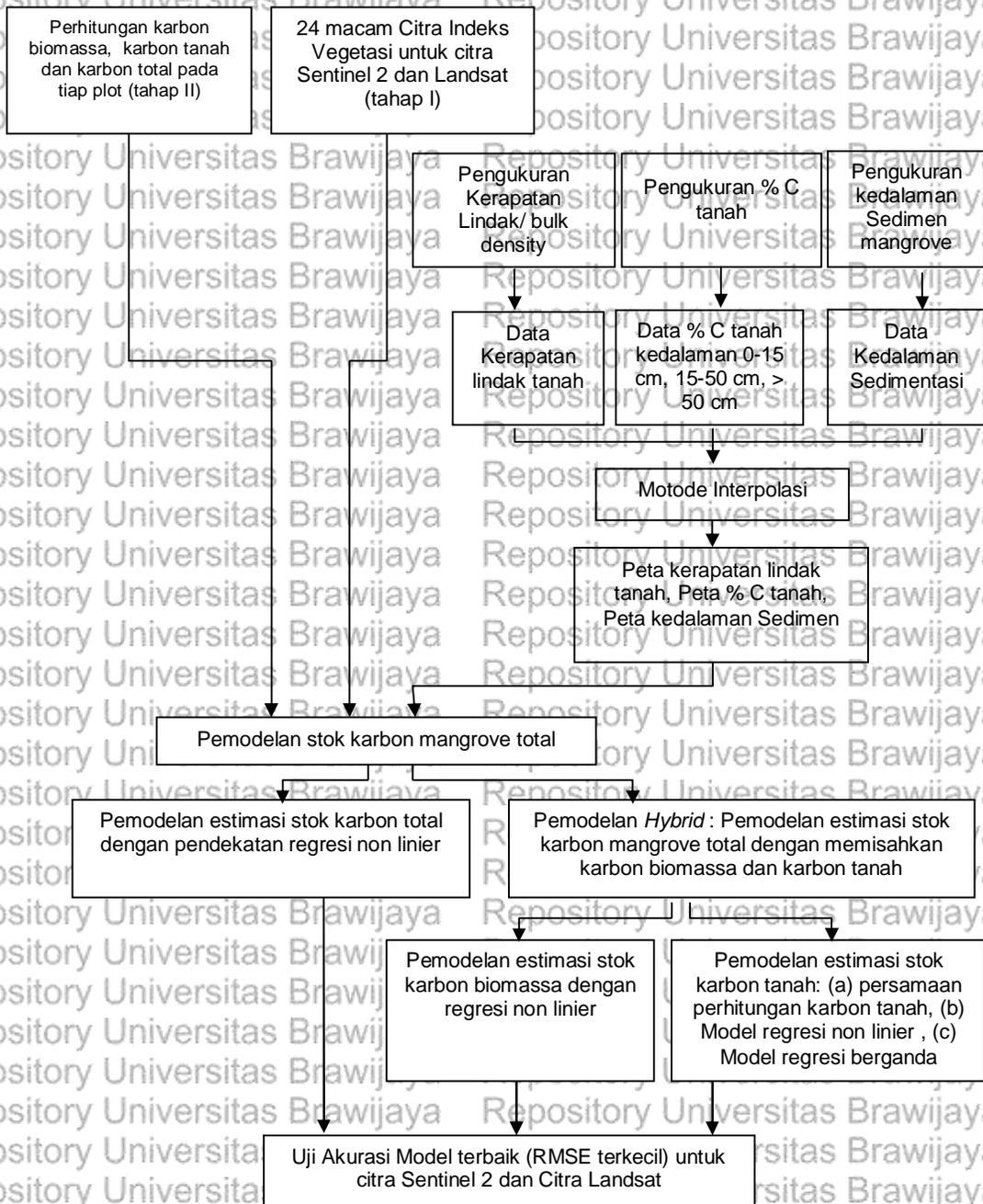
2) Kerangka operasional tahap II: Pengukuran lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove



Gambar 26. Kerangka Operasional Penelitian Tahap II



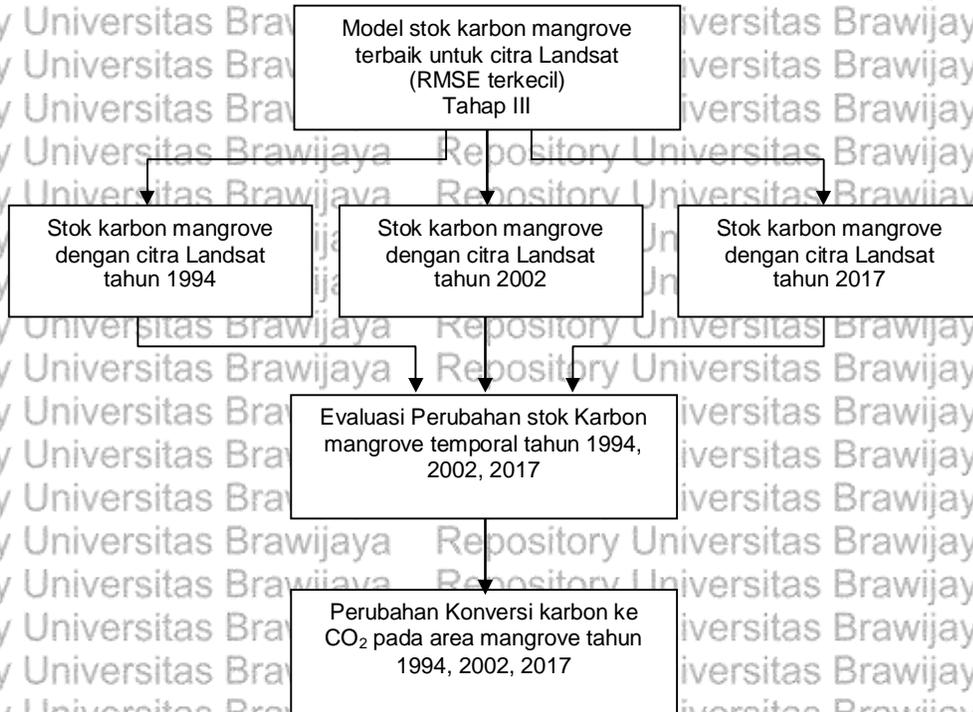
3) Kerangka Operasional Tahap III : Pemodelan *hybrid* estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat



Gambar 27. Kerangka Operasional Penelitian Tahap III



4) Kerangka Operasional Tahap IV : Evaluasi perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017.



Gambar 28. Kerangka Penelitian Operasional Tahap IV.

Tabel 12. Tahapan penelitian

Analisis	Output	Sumber
Tahap I		
- Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode indeks vegetasi dan masking wilayah mangrove		
- Praprosesing koreksi radiometrik dengan metode at-sensor reflectance	Citra terkoreksi radiometrik	(Lillesand <i>et al.</i> , 2004; Rees, 2012; Thenkabail, 2015)
- Koreksi geometri pada penelitian ini tidak dilakukan karena citra sudah terkoreksi.	Citra terkoreksi geometri	(Lillesand <i>et al.</i> , 2004; Rees, 2012; Thenkabail, 2015)
- Transformasi indeks vegetasi, dengan metode : BR, GNVl, GR, SAVI, MSAVI, NDRE, NDVI, NDVI2, NDWI, NNIP, PSRI, RR, RVI, SVI, VIRE, VIRRE, WVVI, MTV1, MTV2, RDVI, VARI, VIGeen, MSR, TVI	Citra indeks vegetasi dengan metode indeks vegetasi	Tabel Indeks vegetasi
- Masking wilayah mangrove dengan metode <i>hybrid</i> NDVI dan metode Otsu Threshold.	Area mangrove	(Otsu, 1979; Syamani <i>et al.</i> , 2016)
- Penentuan lokasi sampel	Lokasi sample	(Kauffman & Donato, 2012)



Analisis	Output	Sumber
<p>Tahap II</p> <p>Pengukuran lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identifikasi mangrove, dbh, kerapatan, frekuensi, INP, dominasi - Estimasi biomassa dan karbon mangrove pada permukaan dan biomassa bawah permukaan mangrove di lapang 	<p>Didapatkan identifikasi mangrove, data dbh, kerapatan, frekuensi, dan dominasi mangrove</p> <p>Didapatkan stok biomassa mangrove atas permukaan (batang, daun, semak), stok biomassa bawah permukaan (akar), stok bahan organik (pohon mati, kayu mati, serasah), tanah.</p> <p>Didapatkan karbon biomassa, karbon dari bahan organik mati dan karbon tanah</p> <p>Didapatkan karbon total pada masing-masing plot sampel</p>	<p>SNI survei dan pemetaan mangrove, (Manuriet <i>et al.</i>, 2011)</p> <p>SNI 7724:2011; (Kauffman & Donato, 2012; Sutaryo, 2009)</p> <p>(batang, daun, semak), stok biomassa bawah permukaan (akar), stok bahan organik (pohon mati, kayu mati, serasah), tanah.</p> <p>Didapatkan karbon biomassa, karbon dari bahan organik mati dan karbon tanah</p> <p>Didapatkan karbon total pada masing-masing plot sampel</p>
<p>Tahap III</p> <p>Pemodelan <i>hybrid</i> estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat</p> <p>Pemetaan kerapatan lindak tanah, % C tanah dan kedalaman sedimen dengan metode interpolasi pengukuran data lapang (data kerapatan lindak, % C tanah, pengukuran kedalaman)</p> <p>Pemodelan stok karbon mangrove.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pemodelan estimasi karbon total dengan indeks vegetasi (citra Sentinel-2 dan LDCM) dengan pendekatan regresi. 2. Pemodelan <i>Hybrid</i> : Pemodelan estimasi karbon mangrove dengan memisahkan karbon biomassa dan karbon tanah. <ul style="list-style-type: none"> - Pemodelan estimasi karbon biomassa dengan regresi non linier - Pemodelan estimasi karbon tanah: (a) persamaan perhitungan karbon tanah, (b) Model regresi non linier, (c) Model regresi berganda 	<p>Peta kedalaman sedimentasi mangrove, Peta kerapatan lindak dan peta % C tanah.</p>	<p>(Pohl & Genderen, 2015; Thenkabail, 2015)</p> <p>1. Model estimasi karbon total dengan indeks vegetasi. (Danoedoro <i>et al.</i>, 2015; Candra <i>et al.</i>, 2016; Li <i>et al.</i>, 2007; Wahyuni, 2014; Yu <i>et al.</i>, 2014)</p> <p>2. Model estimasi biomassa dan model estimasi karbon tanah ((a) dengan persamaan perhitungan karbon tanah, (b) dengan model regresi non linier, (c) dengan model regresi berganda)</p>

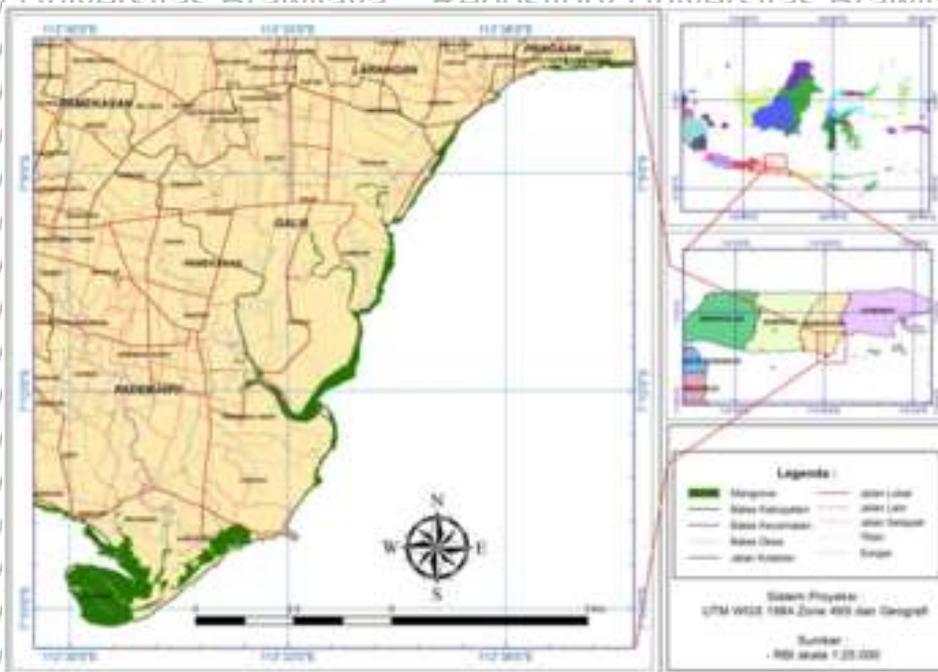
Analisis	Output	Sumber
Uji akurasi dengan RMSE dan % RMSE.	RMSE untuk semua model didapatkan model terbaik	(Alan <i>et al.</i> , 2017; Köhl <i>et al.</i> , 2006; Weng, 2010a; Kamal, 2015; Thenkabail, 2016; Chuvieco <i>et al.</i> , 2010; Alparone <i>et al.</i> , 2015; Vicharnakorn <i>et al.</i> , 2014)
Tahap IV Evaluasi Perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO ₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017 Evaluasi perubahan stok karbon diakses untuk penelitian ini adalah (1) Citra Landsat 5 tahun 1994, (2) Citra Landsat 7 tahun 2002, (3) Citra Landsat 8 (LDCM) tahun 2017. Total stok karbon dapat dikonversi menjadi CO ₂ e	Stok karbon mangrove tahun 1994, tahun 2002 dan tahun 2017. Konversi karbon ke CO ₂ e	(Kauffman & Donato, 2012)



BAB IV. METODE PENELITIAN

4.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian di Kabupaten Pamekasan Kecamatan Larangan, Galis, Pademawu, dan Tlanakan. Kabupaten Pamekasan terletak di Pulau Madura Provinsi Jawa Timur. Pulau Madura terdiri dari 4 kabupaten, yaitu: Kabupaten Bangkalan, Sampang, Pamekasan, dan Sumenep. Pada lokasi penelitian terdapat delta sungai Kalisemajid. Wilayah mangrove penelitian dipilih karena memiliki area mangrove yang luas dan tebal. Hasil klasifikasi citra satelit didapatkan luas area mangrove di lokasi penelitian sebesar 688 ha. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 29.



Gambar 29. Peta Lokasi Penelitian

4.2. Metode Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan terdiri dari 4 tahapan, yaitu : 1) Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode



indeks vegetasi dan masking hasil klasifikasi wilayah mangrove, 2) Pengukuran data lapang mangrove untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove, 3) Pemodelan *hybrid* untuk estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat. 4) Penerapan pemodelan untuk evaluasi perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017.

4.2.1. Tahap 1 : Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode indeks vegetasi dan masking wilayah mangrove

Tahapan dalam tahap 1, yaitu: a) Praprosesing koreksi radiometrik citra satelit dengan menggunakan metode *at-sensor reflectance*; b) Koreksi geometri citra tidak dilakukan karena citra sudah terkoreksi; c) Transformasi indeks vegetasi dengan 24 metode : BR, GNDVI, GR, SAVI, MSAVI, NDRE, NDVI, NDVI2, NDWI, NNIP, PSRI, RR, RVI, SVI, VIRE, VIRRE, WVVI, MTV1, MTV2, RDVI, VARI, VIGeen, MSR, TVI; d) Pemisahan wilayah mangrove hasil klasifikasi dengan metode *Otsu Threshold*; f) Penentuan lokasi plot sampling.

4.2.1.1. Koreksi radiometrik

Koreksi radiometrik yang dipergunakan adalah metode *at-sensor reflectance*. Metode ini dilakukan dengan mengubah nilai piksel (*digital number*) ke *at-sensor radiance*. Kemudian dilakukan konversi ke *at-sensor reflectance*. Persamaan sebagai berikut (Danoedoro *et al.*, 2015; Lillesand *et al.*, 2004):

$$L_x = offset_x + Gain_x \times (BV)_x \dots\dots\dots (1)$$

$$Gain_x = (L_{maks} - L_{min}) / BV_{maks} \dots\dots\dots (2)$$

L_x adalah nilai radiansi; BV adalah *Brightness Value*; dan *Offset*, *Gain* dari perhitungan matematis nilai radiansi spektral maksimum-minimum pada metadata citra. Nilai *radiance* dirubah menjadi nilai *at-sensor reflectance* berdasarkan persamaan:

$$\rho P = \frac{\pi \cdot L_x \cdot d^2}{ESUN_x \cdot \cos \theta_s} \dots\dots\dots (3)$$



$$d = 1 - 0,01674 \cos(0,9856(JD - 4)) \dots \dots \dots (4)$$

- Dimana :
- ρ_P = nilai *at-sensor reflectance*;
 - L_x = nilai radianasi ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$);
 - π = 3,142857142857143;
 - d = jarak bumi-matahari (unit astronomi);
 - $ESUN_x$ = nilai spektral iradiansi matahari ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$);
 - Θ_s = Sudut zenith matahari (derajat);
 - JD = *Julian Day*.

Metode *at-sensor reflectance* lebih baik dari beberapa koreksi radiometrik menggunakan metode penyesuaian histogram, kalibrasi bayangan, dan koreksi *at-surface reflectance* (Danoedoro *et al.*, 2015).

4.2.1.2. Koreksi geometri

Pada penelitian ini citra yang dipergunakan adalah citra Sentinel-2, LDCM, Landsat 7 dan Landsat 5 sudah terkoreksi geometri, sehingga tidak dilakukan koreksi geometri ulang.

4.2.1.3. Transformasi Indeks Vegetasi

Setelah citra dilakukan koreksi dilakukan tahapan selanjutnya, yaitu: 1) analisis indeks vegetasi yang mempergunakan 24 metode indeks vegetasi, 2) klasifikasi mangrove dengan menggunakan metode *Otsu Threshold*. Indeks vegetasi yang dipergunakan adalah indeks vegetasi struktur. Indeks vegetasi yang dipilih disesuaikan dengan saluran yang dimiliki citra Sentinel-2 dan Landsat. Indeks vegetasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Persamaan Indeks vegetasi yang dipergunakan pada penelitian.

No	Indeks	Persamaan	Sumber
1	BR (<i>Blue Ratio</i>)	$\left(\frac{R}{B}\right) \times \left(\frac{G}{B}\right) \times \left(\frac{RE1}{B}\right) \times \left(\frac{NIR1}{B}\right)$	(Waser <i>et al.</i> , 2014; Ng <i>et al.</i> , 2017)
2	GNDVI (<i>Green normalized difference Vegetation index</i>)	$\frac{NIR1 - G}{NIR1 + G}$	(Gitelson & Merzlyak, 1997)
3	GR (<i>Green Ratio</i>)	$\frac{G}{R}$	(Waser <i>et al.</i> , 2014)
4	SAVI (<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)	$\frac{(1 + 0.2) * (NIR1 - NIR2)}{(NIR1 + NIR2) + 0.2}$	(Huete, 1988; Roujean & Breon, 1995; Haboudane <i>et al.</i> , 2004)



No	Indeks	Persamaan	Sumber
5	MSAVI(modified SAVI)	$\frac{1}{2} [2 * NIR1 + 1 + \sqrt{(2 * NIR1 + 1)^2 - 8 * (NIR1 - R)}]$	(Qi <i>et al.</i> , 1994)
6	NDRE (Normalized difference Red-Edge index)	$\frac{NIR1 - RE}{NIR1 + RE}$	(Eitel <i>et al.</i> , 2011; Ramoelo <i>et al.</i> , 2015)
7	NDVI (normalized difference vegetation index)	$\frac{NIR1 - R}{NIR1 + R}$	(Rouse <i>et al.</i> , 1973; Pettorelli <i>et al.</i> , 2011; Gitelson & Merzlyak, 1997)
8	NDVI2 (normalized difference vegetation index)	$\frac{NIR2 - R}{NIR2 + R}$	(Rouse <i>et al.</i> , 1973)
9	NDWI (Normalized Difference Water Index)	$\frac{G - NIR1}{G + NIR1}$	(Gao, 1996)
10	NNIP (Normalized Near Infrared)	$\frac{NIR1}{(NIR1 + R + G)}$	(Sripada <i>et al.</i> , 2005; Ng <i>et al.</i> , 2017)
11	PSRI (Plant Senescence Reflectance Index)	$\frac{R - B}{RE1}$	(Merzlyak <i>et al.</i> , 1999)
12	RR (Red Ratio)	$\left(\frac{NIR1}{R}\right) \times \left(\frac{G}{R}\right) \times \left(\frac{NIR1}{RE1}\right)$	(Waser <i>et al.</i> , 2014)
13	RVI (Ratio Vegetation index)	$\frac{NIR1}{R}$	(Broge & Leblanc, 2001)
14	SVI (Sentinel Improved Vegetation Index)	$\frac{NIR2 - R}{NIR2 + R}$	(Ng <i>et al.</i> , 2017)
15	VIRE (Vegetation Index based on RedEdge)	$\frac{10.000 - NIR1}{RE1^2}$	(Ng <i>et al.</i> , 2017)
16	VIRRE (Vegetation Index Ratio based on RedEdge)	$\frac{NIR1}{RE1}$	(Ng <i>et al.</i> , 2017)
17	WVVI (World View Improved Vegetative Index)	$\frac{NIR2 - RE1}{NIR2 + RE1}$	(Wolf, 2012)
18	MTV (Modified Triangular Vegetation Index 1)	$1,2 * [1,2 * (NIR - G) - 2,5 * (R - G)]$	(Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
19	MTV 2 (Modified Triangular Vegetation Index 2)	$1,5 * (1,2 * (NIR + G) - 2,5 * (R + G)) \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - (6 * NIR - 5 * \sqrt{R})} - 0,5$	(Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
20	RDVI (renormalized difference vegetation index)	$[(NIR - R) / (NIR + R)^2]$	(Roujean & Breon, 1995)
21	VARI (vegetation atmospherically resistant index)	$\frac{(G - R)}{(G + R - B)}$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)
22	VI green	$\frac{(G - R)}{(G + R)}$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)



No	Indeks	Persamaan	Sumber
23	MSR (<i>Modified Simple Ratio</i>)	$\frac{\left(\frac{NIR}{R}\right) + 1}{\left(\frac{NIR}{R}\right) - 1}$	(Chen, 1996; Haboudane et al., 2004)
24	TVI (<i>triangular vegetation index</i>)	$0.5 * (120 * (NIR - G)) - 200 * (R - G)$	(Broge & Leblanc, 2001)

Keterangan : Blue (B), Green (G), Red (R), Near-infrared 1 (NIR1), Near-infrared 2 (NIR2), Red Edge 1 (RE1), Red Edge 2 (RE2).

4.2.1.4. Masking wilayah mangrove

Masking wilayah mangrove bertujuan untuk memisahkan wilayah mangrove dengan wilayah yang bukan mangrove. Metode yang dipergunakan adalah metode *hybrid* NDVI dengan mendeteksi hutan mangrove dan bukan menggunakan nilai *threshold* dari NDVI. Metode *automatic thresholding* yang dipergunakan adalah *Otsu Threshold*. Metode ini diformulasikan oleh Professor Nobuyuki Otsu dari Tokyo University tahun 1979 (Otsu, 1979). Metode ini secara otomatis dapat memisahkan antara vegetasi yang kecil (semai), pancang dan

pohon. Persamaan *Otsu Threshold* :

$$\begin{cases} \sigma^2 = P_{nw} \cdot (M_{nw} - M)^2 + P_w \cdot (M_w - M)^2 \\ M = P_{mw} \cdot M_{nw} + P_w \cdot M_w \\ P_{nw} + P_w = 1 \end{cases}$$

$$t^* = ArgMax\{P_{nw} \cdot (M_{nw} - M)^2 + P_w \cdot (M_w - M)^2\} \dots\dots\dots (5)$$

- Keterangan :
- σ^2 = varian di dalam kelas perairan maupun bukan perairan
 - Pnw = probabilitas nilai pixel untuk masuk kelas bukan perairan
 - Pw = probabilitas nilai pixel untuk masuk kelas perairan
 - Mnw = rata-rata nilai pixel kelas bukan perairan
 - Mw = rata-rata nilai pixel kelas perairan
 - M = rata-rata nilai pixel citra NDVI
 - t* = nilai threshold

Dalam penelitian ini penentuan *otsu Threshold* ini dengan menggunakan software Fiji.



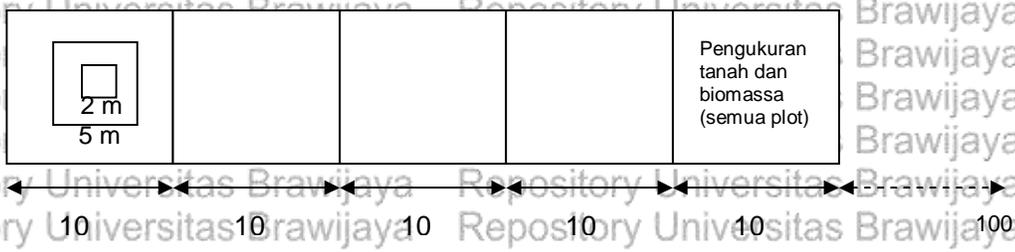
4.2.1.5. Penentuan lokasi sampel

Tahap selanjutnya menentukan titik-titik sampel untuk pengambilan data lapangan pengukuran pohon, pancang, kayu mati, tumbuhan bawah/sampah dan tanah. Jumlah plot yang dibutuhkan harus dihitung sebagai berikut:

$$\text{jumlah minimum plot sampel } (n) = \left(\frac{t \cdot s}{E} \right)^2 \dots \dots \dots (6)$$

keterangan:

- n = jumlah plot sampel,
- t = sampel statistik dari t-distribusi untuk interval kepercayaan 95%, t biasanya ditetapkan pada 2, ukuran sampel tidak diketahui;
- s = standar deviasi yang diharapkan atau diketahui dari data sebelumnya atau awal;
- E = kesalahan yang diperbolehkan atau diinginkan setengah lebar dari selang kepercayaan, dihitung dengan mengalikan stok karbon rata-rata dengan presisi yang diinginkan, yaitu berarti * 0,1 (untuk 10% presisi)(Kauffman & Donato, 2012).



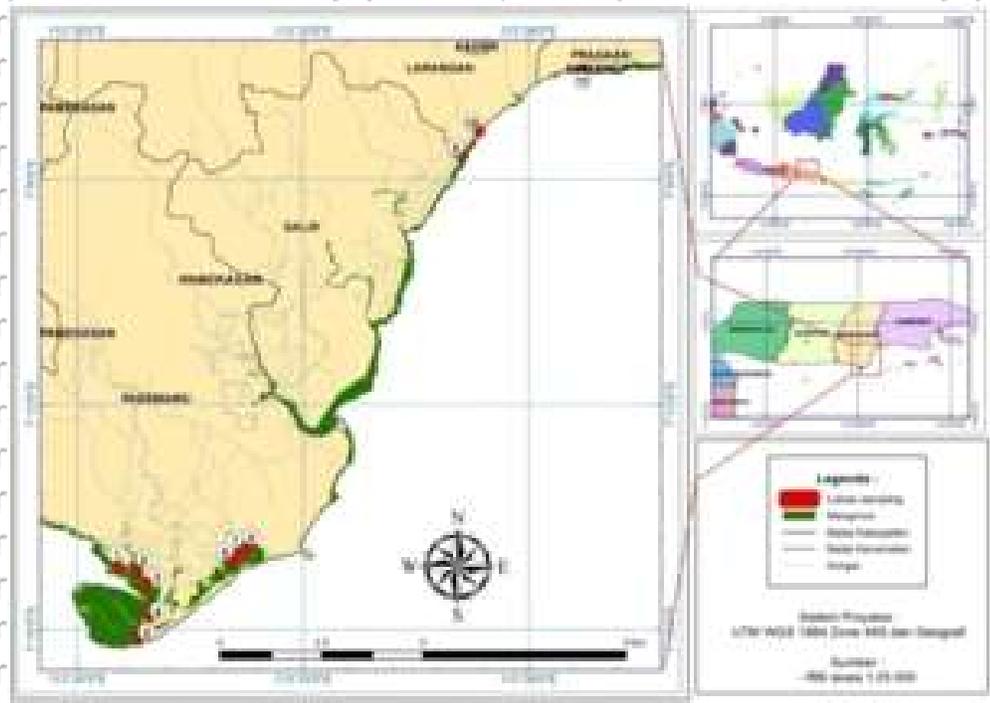
Gambar 30. Desain pengambilan sampel lapangan di transek untuk memperkirakan karbon di atas dan di bawah tanah yang dimodifikasi (Murdiyarso et al., 2009; Kauffman & Donato, 2012; Hairiah, et al., 2001)

Penelitian ini dalam penentuan plot sampel menggunakan metode *stratified random sampling*. Penentuan stratifikasi berdasarkan kondisi volume tegakan biomassa mangrove dan lokasi mangrove berdasarkan mangrove muara dan mangrove laut. Jumlah startifikasi dalam penelitian terdapat 11 stasiun. Pada masing-masing stasiun/strata terdapat 10 plot. Desain plot pada setiap stasiun seperti pada Gambar 30. Total jumlah plot sampel pada penelitian ini terdapat 110 plot. Jenis mangrove berdasarkan lokasi penelitian dibagi menjadi mangrove

muara dan mangrove laut. Lokasi mangrove muara pada stasiun 1, 2, 3, 4, 5 dan untuk stasiun mangrove laut pada stasiun 6, 7, 8, 9, 10, 11 (Gambar 31).

Menghitung stok karbon hutan yang beranekaragam perlu distratifikasi. Tujuan stratifikasi adalah membedakan kondisi tegakan berdasarkan perbedaan volume biomassa, sehingga meningkatkan ketelitian. Penerapan stratifikasi awal menggunakan data citra penginderaan jauh sehingga meningkatkan akurasi dan efektifitas biaya (Stringer *et al.*, 2015; Jones *et al.*, 2014; Eckert *et al.*, 2011; Hamdan *et al.*, 2013)

Metode stratified sampling disarankan untuk inventarisasi karbon di hutan tropis Indonesia karena memiliki variasi stok karbon yang sangat tinggi. Pada setiap stratifikasi dilakukan pengukuran karbon dengan menempatkan plot-plot pengukuran. Metode *stratified random sampling* menghasilkan pendugaan yang lebih teliti dibandingkan metode lain (Wibowo, 2010; Lugina *et al.*, 2011).

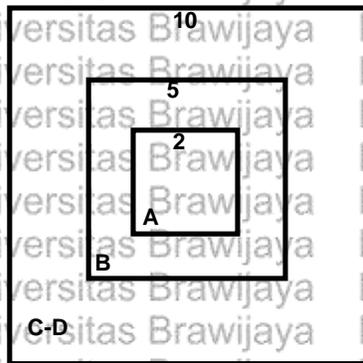


Gambar 31. Titik sampel di Desa Manjungan Kecamatan Pademawu Kabupaten Pamekasan.



4.2.2. Tahap II : Pengukuran lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove

Pada tahap awal setelah menentukan lokasi titik sampel, maka menentukan ukuran plot. Ukuran plot/petak dalam penelitian ini disesuaikan dengan pixel pada citra sentinel-2 yang dipergunakan yaitu 10x10 m. Plot sebagai berikut: a) Semai luasan minimal 4 m²; b) Pancang luasan minimal 25 m²; c) Tiang luasan minimal 100 m²; d) Pohon luasan minimal 100 m². Bentuk dan ukuran plot lihat Gambar 32.



Keterangan gambar :

A : sub plot untuk semai, serasah, tumbuhan bawah

B : sub plot untuk pancang

C-D : sub plot untuk tiang dan pohon

Gambar 32. Contoh bentuk plot persegi

4.2.2.1. Identifikasi mangrove, dbh, kerapatan, frekuensi, INP, dominasi

Pada tahap awal dilakukan identifikasi jenis mangrove. Identifikasi ini berdasarkan panduan pengenalan mangrove di Indonesia yang dibuat oleh Wetlands International dan Ditjen PHKA. Pohon mangrove memiliki banyak kesamaan, pengamatan difokuskan pada perbedaan kulit kayu, tipe akar serta bunga/buahnya. Jika waktu pengamatan tidak memungkinkan, dilakukan dengan mengambil daun, bunga, dan buah dari pohon yang akan diidentifikasi (Noor et al., 1999; Tomlinson, 1986).

Struktur vegetasi mangrove ditentukan dengan menganalisis parameter dalam SNI 7717:2011 tentang survei dan pemetaan mangrove (Ati et al., 2014; Rachmawati et al., 2007; Manuri et al., 2013; Sutaryo, 2009), yaitu :



a. Kerapatan:

$$\text{Kerapatan Mutlak (KM)} = \frac{\sum \text{Individu suatu jenis}}{\text{Luas plot contoh}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Kerapatan Relatif (KR)} = \frac{\text{Kerapatan mutlak suatu jenis}}{\sum \text{Total kerapatan mutlak jenis}} \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

b. Frekuensi

$$\text{Frekuensi Mutlak (FM)} = \frac{\sum \text{Plot yang ditempati suatu jenis}}{\sum \text{Seluruh plot contoh}} \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Frekuensi Relatif (FR)} = \frac{\text{Frekuensi suatu jenis}}{\text{Frekuensi total seluruh jenis}} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

c. Dominasi

$$\text{Dominasi Mutlak (DM)} = \frac{\text{Luas basal area suatu jenis } (\frac{1}{4}\pi d^2)}{\text{Luas area penelitian}} \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{Dominasi Relatif (DR)} = \frac{\sum \text{Dominansi suatu jenis}}{\sum \text{Dominansi seluruh jenis}} \times 100\% \dots\dots\dots (12)$$

d. Indeks Nilai Penting

$$\text{Untuk pohon : INP} = \text{KR} + \text{FR} + \text{DR} \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{Untuk pancang dan semai : INP} = \text{KR} + \text{FR} \dots\dots\dots (14)$$

4.2.2.2. Estimasi biomassa dan karbon mangrove pada permukaan dan biomassa bawah permukaan mangrove di lapang

Pengukuran biomassa mangrove menggunakan SNI 7724:2011 tentang

pengukuran dan perhitungan stok karbon—pengukuran lapangan untuk

penaksiran stok karbon hutan (Kauffman & Donato, 2012; Bismark *et al.*, 2008;

Dharmawan & Siregar, 2008; Dharmawan, 2010).

1) Pengukuran biomassa di atas permukaan tanah

a. Pengukuran biomassa pohon, tahapan pengukuran biomassa pohon

dilakukan sebagai berikut:

- identifikasi nama dan jenis pohon mangrove;

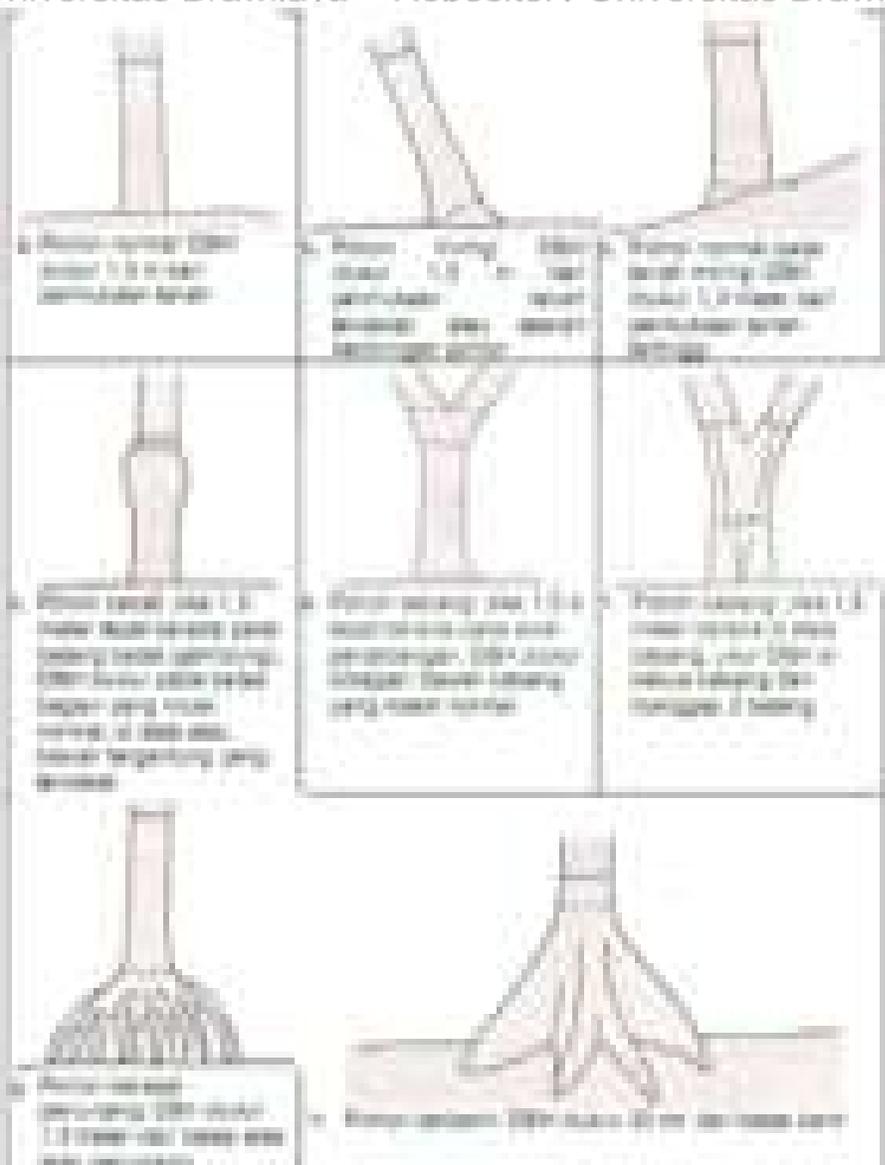
- ukur diameter setinggi dada (dbh) setiap pohon mangrove dalam petak;

- catat data dbh dan nama jenis ke dalam lembar perhitungan;



- hitung biomassa pohon mangrove.

Pengukuran diameter setinggi dada (dbh) pada kondisi pohon mangrove di lapangan dapat mengacu pada Gambar 33. Dalam penelitian ini untuk menduga biomassa pohon mangrove menggunakan persamaan alometrik dari beberapa penelitian sebelumnya. Persamaan alometrik yang dipergunakan dapat dilihat pada Tabel 14.



Gambar 33. Pengukuran diameter setinggi dada pada berbagai kondisi pohon(SNI 7724:2011) (Hairiah et al., 2001).



Tabel 14. Persamaan Alometrik untuk pendugaan biomassa pohon mangrove.

No	jenis	Persamaan	Sumber
1	<i>Avicennia marina</i>	$W = 0,1848(\text{DBH})^{2,3524}$ $R^2 = 0,9839, n=47, \text{DBH max}=35,2$	(Dharmawan & Siregar, 2008)
2	<i>Avicennia germinans</i>	$W = 0,140 (\text{DBH})^{2,40}$ $R^2 = 0,97, n = 25, \text{Dmax}= 42 \text{ cm},$	(Fromard <i>et al.</i> , 1998)
3	<i>Laguncularia racemosa</i>	$W = 103,3 (\text{DBH})^{2,5}$ $R^2 = 0,97, n = 70, \text{Dmax} = 10 \text{ cm},$	(Fromard <i>et al.</i> , 1998)
4	<i>Rhizophora apiculata</i>	$W=0,0695 (\text{DBH})^{2,644}$ $R^2=0,89, n=191, \text{DBH max} = 60$	(Kauffman & Cole, 2010)
5	<i>Rhizophora mangle</i>	$W = 0,722 (\text{DBH})^{1,731}$ $R^2 = 0,94, n = 14, \text{Dmax} = 20 \text{ cm},$	(Smith & Whelan, 2006)
6	<i>Rhizophora stylosa</i>	$\log W = -0,696 + 2,465 \log (\text{DBH})$ $R^2 = 1, n = 6, \text{DBH} = - \text{cm},$	(Comley & McGuinness, 2005)
7	<i>Rhizophora candelaria</i>	$W=3,3512 (\text{DBH})^{0,7652}$ $R^2=0,888, n=270, \text{DBH} = 0,4-7$	(Robertson & Along, 1992)
8	<i>Rhizophora spp.</i> (mangle dan <i>racemosa</i>)	$W = 128,2 (\text{DBH})^{2,60}$ $R^2 = 0,92, n = 9, \text{Dmax} = 32 \text{ cm},$	(Fromard <i>et al.</i> , 1998)
9	<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	$W=0,0754 (\text{DBH})^{2,505}$ $R^2=0,91, n=326, \text{DBH max}=132 \text{ cm}$	(Kauffman & Cole, 2010)
10	<i>Bruguiera parviflor</i>	$W=0,1679 (\text{DBH})^{2,4167}$ $R^2=0,993, n=16, \text{DBH} = 2-21 \text{ cm}$	(Robertson & Along, 1992)
11	<i>Bruguiera exaristata</i>	$\log W = -0,643 + 1,141 \log (\text{DBH})$ $R^2 = 0,99, n = 10, \text{DBH} = -$	(Comley & McGuinness, 2005)
12	<i>Ceriops tagal var. australis</i>	$W=0,1885 (\text{DBH})^{2,3379}$ $R^2=0,989, n=26, \text{DBH} = 2-8 \text{ cm}$	(Robertson & Along, 1992)
13	<i>Xylocarpus granatum</i>	$W=0,0823 (\text{DBH})^{2,5883}$ $R^2=0,994, n=15, \text{DBH} = 3-17 \text{ cm}$	(Robertson & Along, 1992)
14	<i>Sonneratia apetala</i>	$W = 2,835 (\text{DBH})^{3,214}$	(Lunstrum & Chen, 2014)
15	<i>Sonneratia alba</i>	$W = 0,3841 (\text{DBH})^{2,101}$ $R^2=0,98; N=104, \text{DBH max}=323 \text{ cm}$	(Cole <i>et al.</i> , 1999; Kauffman & Cole, 2010)
	umum	$W = 0,251p*(\text{DBH})^{2,46}$ $R^2 = 0,98, n = 104, \text{DBH mas}=49$ $W=p*\exp(-1,349+1,980\ln(\text{DBH})+0,207*(\ln(\text{DBH}))^2-0,0281(\ln(\text{DBH}))^3)$ $R^2 = 0,45, n = 69, \text{DBH max}=42 \text{ cm}$ $W=0,168*p*(\text{DBH})^{2,471}$ $R^2=0,99, n=84, \text{DBH max}=42 \text{ cm}$	(Komiya <i>et al.</i> , 2005) (Chave <i>et al.</i> , 2005) (Chave <i>et al.</i> , 2005); (Komiya <i>et al.</i> , 2008)

b. Pengukuran biomassa tumbuhan bawah

Pengukuran biomassa tumbuhan bawah dengan tahapan sebagai berikut: dengan menggunakan gunting stek potong semua bagian tumbuhan bawah di atas permukaan tanah, dalam area plot timbang berat basah total tumbuhan bawah, sebanyak ± 300 gram ambil dan timbang berat basah tumbuhan sebagai contoh; lakukan pengeringan dengan menggunakan oven di laboratorium



dengan kisaran suhu 70 °C sampai dengan 85 °C hingga mencapai berat konstan; timbang berat kering tumbuhan bawah; lakukan analisis karbon organik di laboratorium untuk melihat stok karbonnya (SNI 7724:2011);

2) **Pengukuran biomassa serasah**, dalam SNI 7724:2011 menjelaskan bahwa pengukuran serasah untuk tipe nisbah akar pucuk mangrove tidak dilakukan pada penelitian ini. Hal tersebut karena faktor pasang surut air laut yang menyebabkan serasah yang diukur sepenuhnya bukan berasal dari tegakan mangrove pada lokasi tersebut. Kauffman & Donato (2012) menjelaskan *vegetasi understory* (misalnya bibit dan tumbuhan) umumnya diabaikan di hutan bakau dan pengukuran untuk stok karbon biasanya tidak diperlukan.

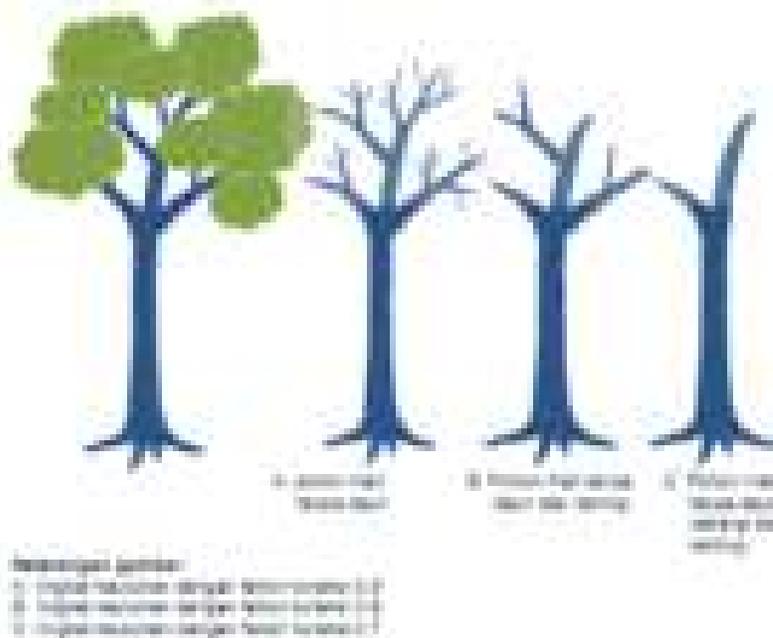
3) **Pengukuran biomassa pohon mati dan kayu mati (*necromass*)**,

a. **Pengukuran biomassa pohon mati**. Penelitian ini pengukuran biomassa pohon mati menggunakan metode alometrik. Tahapan pengukuran biomassa pohon mati dengan metode alometrik sebagai berikut:

- Pengukuran dbh pohon mati;

- Penentuan tingkat keutuhan pohon mati dengan melihat Gambar 34;

- Perhitungan biomassa pohon mati dengan persamaan alometrik dikalikan dengan faktor koreksi dari tingkat keutuhan pohon mati (lihat Gambar 34).



Gambar 34. Tingkat keutuhan pohon mati (Kauffman & Donato, 2012).

b. Pengukuran biomassa kayu mati. Penelitian ini pengukuran biomassa

kayu mati berdasarkan penimbangan langsung, tahapannya sebagai berikut:

- kayu mati pada plot pengukuran dikumpulkan;
- dilakukan penimbangan berat total dari kayu mati;
- diambil contoh dan timbang minimal 300 gram;
- contoh kayu mati dilakukan pengeringan dengan menggunakan oven terhadap pada kisaran suhu 70°C sampai dengan 85°C hingga beratnya konstan;

- timbang berat kering contoh kayu mati.

4) Pengukuran stok karbon organik tanah, pada tanah mineral mangrove

melalui tahapan sebagai berikut (Lugina *et al.*, 2011; BSN, 2011):

- Pengambilan contoh tanah dari keempat arah mata angin dan tengah plot.



- Contoh tanah dilakukan komposit dengan mehcampurkan contoh tanah dari kelima titik dan pada kedalaman 0 - 5 cm, 15-50 cm, dan >50 cm.
- Pengambilan sampel tanah pada masing-masing titik dengan ring soil, pada kedalaman 0 - 5 cm;
- Contoh tanah dari ring soil sampler ditimbang berat basahnya di lapangan;
- Pengeringan contoh tanah dengan dianginkan di laboratorium; dan dilakukan penimbangan dan pencatatan berat;
- Dilakukan analisis berat jenis tanah dan stok karbon organik tanah.

Berat jenis tanah ditentukan dengan membagi sampel tanah oven-kering dengan volume sampel. sebagai berikut (Kauffman & Donato, 2012) :

$$\text{Berat jenis tanah (gcm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{sampel massa kering-oven (g)}}{\text{Volume sampel (m}^3\text{)}} \dots\dots\dots (15)$$

5) Pengukuran biomassa di bawah permukaan tanah/akar, dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$B_{bp} = NAP \times B_{ap} \dots\dots\dots (16)$$

Keterangan:
 B_{bp} : biomassa di bawah permukaan tanah (kg);
 NAP : nilai nisbah akar pucuk;
 B_{ap} : nilai biomassa atas permukaan (*above ground biomass*), (kg)

Tabel 15. Nisbah akar pucuk pada berbagai tipe hutan tropis

Tipe hutan	Nisbah akar pucuk	Contoh lokasi
Hutan hujan tropis	0,37	Hutan campuran Dipterocarpa di Kalimantan
Hutan yang menggugurkan daun	0,20 – 0,24	Hutan jati
Hutan daerah kering tropis	0,28 - 0,56	Hutan savana di NTT
Semak tropis	0,40	Hutan bekas kebakaran
Hutan pegunungan tropis	0,27 -0,28	Hutan wilayah dataran tinggi

Sumber data IPCC 2006 *Guideline for National Greenhouse Gas Inventories* (SNI 7724:2011)

Pada Tabel 15 nisbah akar tidak ada yang spesifik untuk mangrove. Pada penelitian ini menggunakan metode dalam Kauffman dan Donato (2012).



Persamaan umum sebagai berikut (Kauffman & Donato, 2012; Komiyama *et al.*, 2008):

$$B = 0,199 * \rho^{0,899} * (DBH)^{2,22} \dots\dots\dots (17)$$

Keterangan : B = Biomassa bawah tanah (kg),
 ρ = Berat jenis kayu (g cm^{-3}) dalam Tabel 16
 DNH diameter setinggi dada (cm).

Massa karbon akar dihitung sebagai produk dari biomassa akar dan konsentrasi akar karbon. konsentrasi karbon dari akar biasanya lebih rendah dari komponen pohon di atas tanah

Tabel 16. Berat jenis kayu untuk jenis mangrove

Jenis Mangrove	Berat jenis (g cm^{-3})
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	0,741
<i>Rhizophora apiculata</i>	1,050
<i>Rhizophora mangle</i>	0,830
<i>Sonneratia alba</i>	0,078
<i>Avicennia germinans</i>	0,661
<i>Laguncularia racemosa</i>	0,600
<i>Avicennia officinalis</i>	0,670
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	0,860
<i>Ceriops decandra</i>	0,960
<i>Excoecaria agallocha</i>	0,450
<i>Heritiera fomes</i>	1,074
<i>Sonneratia apetala</i>	0,559
<i>Xylocarpus granatum</i>	0,700
<i>Xylocarpus mekongensis</i>	0,725
Rata-rata	0,752

Sumber: (Kauffman & Donato, 2012)

6) Perhitungan Stok Karbon, perhitungan stok karbon didasarkan pada SNI 7724 :2011.

a) **Penghitungan biomassa atas permukaan**. Pada penelitian ini penghitungan biomassa atas permukaan berdasarkan persamaan alometrik (Tabel 14). Biomassa dihitung menggunakan persamaan alometrik yang sesuai dengan nama jenis atau kelompok jenis mangrove.

b) **Penghitungan biomassa bawah permukaan (akar)**, tahapan dilakukan dengan: pertama hitung biomassa pohon atas permukaan; hitung nisbah akar pucuk. Persamaan yang dipergunakan adalah persamaan nomor 17.



c) **Penghitungan bahan organik serasah, kayu mati dan pohon mati,**

dilakukan dengan persamaan:

$$Bo = \frac{Bks \times Bbt}{Bbs} \dots \dots \dots (18)$$

Keterangan: Bo : berat bahan organik (kg);
Bks : berat kering contoh (kg);
Bbt : berat basah total (kg);
Bbs : berat basah contoh (kg)

7) **Penghitungan karbon**, perhitungan karbon didasarkan pada SNI 7724:2011.

a) **Penghitungan karbon dari biomassa**, karbon dari biomassa

diperhitungkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Cb = B \times \% C \text{ organik} \dots \dots \dots (19)$$

Keterangan: Cb : stok karbon biomassa (kg);
B : total biomassa (kg);
%C organik : nilai persentase stok karbon sebesar 0,47 atau nilai persen karbon hasil pengukuran di laboratorium.

b) **Penghitungan karbon dari bahan organik mati (serasah, kayu mati dan pohon mati)**, sebagai berikut:

$$Cm = Bo \times \% C \text{ organik} \dots \dots \dots (20)$$

Keterangan: Cm : stok karbon bahan organik mati (kg);
Bo : total biomassa/bahan organik (kg);
%C organik : nilai persentase stok karbon sebesar 0,47 atau diperoleh dari hasil pengukuran di laboratorium

c) **Penghitungan karbon tanah**, rumus sebagai berikut:

$$Ct = Kd \times \rho \times \% C \text{ organik} \dots \dots \dots (21)$$

Keterangan: Ct : stok karbon tanah ($g \text{ cm}^{-2}$);
Kd : kedalaman contoh tanah (cm)
 ρ : kerapatan lindak (bulk density) ($g \text{ cm}^{-3}$);
% C organik : persentase stok karbon sebesar 0,47 atau dari hasil pengukuran laboratorium pada tanah kedalaman 0-5 cm, 15-50 cm, dan >50 cm.

Menghitung kolam karbon tanah, dengan menjumlahkan massa masing-masing kedalaman tanah sampel. Kolam karbon total tanah ditentukan dengan membagi horizon tanah menjadi interval kedalaman 0-



15 cm, 15-50 cm, >50 cm dan melakukan pengukuran konsentrasi karbon di setiap lapisan (Kauffman & Donato, 2012).

- 8) **Penghitungan stok karbon total pada tiap plot**, perhitungan stok karbon total didasarkan pada SNI 7724 :2011 Menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_{plot} = (C_{bap} + C_{bbp} + C_{km} + C_{pm} + C_{tanah}) \dots\dots\dots (22)$$

Keterangan: C_{plot} : total stok karbon pada plot (ton ha⁻¹);
 C_{bap} : total stok karbon biomassa atas permukaan per hektar pada plot (ton ha⁻¹);
 C_{bbp} : total stok karbon biomassa bawah permukaan per hektar pada plot (ton ha⁻¹);
 C_{km} : total stok karbon kayu mati per hektar pada plot, (ton ha⁻¹);
 C_{pm} : total stok karbon pohon mati per hektar pada plot, (ton ha⁻¹);
 C_{tanah} : total stok karbon tanah per hektar pada plot (ton ha⁻¹).

4.2.3. Tahap III : Pemodelan *hybrid* estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat

4.2.3.1. Pemetaan kerapatan lindak tanah, % C tanah dan kedalaman sedimen dengan metode interpolation pengukuran data lapang (data kerapatan lindak, % C tanah, pengukuran kedalaman).

Pemetaan kedalaman sedimen mangrove, kerapatan lindak dan % C tanah. Parameter tersebut didapatkan dari pengukuran lapang pada semua plot pengukuran (110 plot), data tersebut adalah kedalaman sedimen (cm), kerapatan lindak (g cm⁻³), C organik tanah (%) (kedalaman 0-15 cm, 15-50 cm dan > 50 cm). Data tersebut kemudian dimodelkan untuk mendapatkan peta sebaran kedalaman sedimentasi, peta kerapatan lindak dan peta % C tanah. Metode yang dipergunakan dalam membuat peta tersebut adalah metode interpolasi. Metode interpolasi yang dipergunakan adalah metode kriging (seperti pada persamaan 27).

Kriging adalah metode estimasi dengan memberikan estimator BLUE (*Best Linier Unbiased Estimator*) dari nilai titik atau rata-rata blok. Faktor-



faktor yang mempengaruhi akurasi metode ini, yaitu: banyaknya sampel, posisi sampel, jarak antar sampel dengan titik yang akan diestimasi, kontinuitas spasial dari variabel-variabel yang terlibat. Persamaan kriging sebagai berikut (Chilès & Delfiner, 2012):

$$\hat{Z}(X_0) = m = \sum_{i=1}^k \lambda_i [Z(X_i) - m] \dots \dots \dots (23)$$

Keterangan : m = nilai mean (konstanta skalar)
 λ_i = bobot $z(\lambda_i)$ untuk estimasi lokasi x. Nilai $z(\lambda_i)$ yang sama akan memiliki koefisien bobot yang berbeda untuk estimasi pada lokasi yang berbeda.
 X_i = vector lokasi berbeda.
 k = banyak data yang tersampel untuk estimasi.

4.2.3.2. Pemodelan stok karbon mangrove.

Tahap selanjutnya adalah untuk mencari pemodelan stok karbon mangrove terbaik (dengan akurasi paling tinggi). Beberapa pemodelan dilakukan untuk mendapatkan pemodelan terbaik, yaitu :

- 1) Pemodelan estimasi karbon total dengan indeks vegetasi (citra Sentinel-2 dan LDCM) menggunakan pendekatan regresi.
- 2) Pemodelan *Hybrid* : Pemodelan estimasi karbon mangrove dengan memisahkan karbon biomassa dan karbon tanah, yaitu :
 - a) Pemodelan estimasi karbon biomassa (batang, akar, tanaman bawah) dengan indeks vegetasi menggunakan pendekatan regresi non linier
 - b) Pemodelan estimasi karbon tanah yang dilakukan dengan beberapa model, kemudian dicari model dengan akurasi paling baik (uji RMSE paling kecil). Pemodelan tersebut yaitu:
 - Pemodelan dengan menggunakan persamaan perhitungan karbon tanah (persamaan 21).
 - Pemodelan dengan pendekatan regresi antara stok karbon tanah (variabel terikat) dan indeks vegetasi (variabel bebas).



Pemodelan dengan pendekatan regresi berganda antara stok karbon tanah (variabel terikat) dengan indeks vegetasi, kedalaman sedimen, kerapatan lindak dan % C tanah (variabel bebas)

Indeks vegetasi yang dipergunakan 24 jenis, kemudian dicari yang terbaik.

Mencari persamaan yang terbaik pada tahap awal dilakukan dengan melihat nilai koefisien korelasi (R) dan koefisien determinasi (R^2). Seperti dalam Danoedoro *et al.*, 2015; Candra *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2007; Wahyuni, 2014; Yu *et al.*, 2014 menggunakan analisis statistik regresi non-linear berupa nilai koefisien korelasi (R), koefisien determinasi (R^2). Tahap selanjutnya dilakukan uji RMSE.

Model analisis regresi yang digunakan adalah regresi non-linear terdiri atas eksponensial, logaritmik, polynomial, Power/geometrik untuk mendapatkan rumus. Persamaan regresi sebagai berikut (Davidson & Mackinnon, 1999):

$$\text{Eksponensial : } Y = a * e^{bX} \dots\dots\dots (24)$$

$$\text{Logaritmik : } Y = a + b * \ln(x) \dots\dots\dots (25)$$

$$\text{Polynomial : } Y = a + bX + cX^2 \dots\dots\dots (26)$$

$$\text{Power/geometrik : } Y = a * X^b \dots\dots\dots (27)$$

Model akhir didapatkan dengan mensimulasikan dari pemodelan-pemodelan yang dilakukan diatas, dengan menggabungkan antara model estimasi karbon biomassa terbaik dengan model estimasi karbon tanah terbaik.

Pemodelan dengan menggunakan metode *hybrid*. Metode *hybrid* dengan menggabungkan dua pendekatan yang berbeda, yaitu dengan menggunakan data citra satelit dan data pengukuran lapang. Sebagai contoh untuk pemetaan lahan basah oleh beberapa parameter : (1) menganalisis data citra series tahunan dari satelit dan (2) pemodelan topografi. Metode ini merangkum



berbagai dataset dengan latar belakang yang berbeda dan menggabungkan indeks berasal dari lahan digunakan bersama-sama (Gumbricht, 2015).

Pada penelitian ini tahapan akhir pemodelan dilakukan beberapa simulasi, yaitu :

1. Simulasi model dengan input nilai indeks vegetasi, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah dan % karbon tanah.
2. Simulasi model dengan input nilai indeks vegetasi, kedalaman sedimen dan kerapatan lindak.
3. Simulasi model dengan input nilai indeks vegetasi dan kedalam tanah.
4. Simulasi model dengan input hanya indeks vegetasi.

4.2.3.3. Uji akurasi model dengan RMSE.

Uji akurasi seperti yang dalam penelitian Clark *et al.*, (2011); Kulawardhana *et al.*, (2014); Cartus *et al.*, (2014); Hu *et al.*, (2016); Frananda *et al.*, (2015); Li *et al.*, (2007) menggunakan *correlation coefficient* (r) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk menentukan transformasi indeks vegetasi yang paling baik dalam memodelkan stok karbon pada mangrove. Persamaan regresi ini digunakan untuk membangun peta distribusi stok karbon berdasarkan indeks vegetasi terbaik. Persamaan RMSE sebagai berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \dots\dots\dots (28)$$

$$RMSE \% = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{y}} \dots\dots\dots (29)$$

dimana : x_i = Nilai Stok karbon hasil pengukuran, y_i =prediksi nilai stok karbon, \bar{y} = rata-rata karbon hasil pengukuran (Alan *et al.*, 2017; Köhl *et al.*, 2006; Weng, 2010a; Kamal, 2015; Thenkabail, 2016; Chuvieco *et al.*, 2010; Alparone *et al.*, 2015; Vicharnakorn *et al.*, 2014)



4.2.4. Tahap IV : Evaluasi Perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017.

Tahapan selanjutnya adalah evaluasi perubahan stok karbon mangrove di Pulau Madura dengan memanfaatkan model estimasi stok karbon menggunakan citra satelit Landsat. Evaluasi perubahan ini memanfaatkan citra Landsat karena citra ini memiliki beberapa generasi satelit, mulai dari Landsat 1 sampai 8. Data citra untuk analisis evaluasi perubahan stok karbon mangrove pada penelitian ini adalah (1) Citra Landsat 5 tahun 1994, (2) Citra Landsat 7 tahun 2002, (3) Citra Landsat 8 (LDCM) tahun 2017. Alasan dipergunakannya citra pada tahun tersebut adalah : (1) diperlukan citra yang cukup lama (>8 tahun) sehingga mampu melihat perubahan mangrove, (2) ketersediaan citra yang memenuhi syarat (gangguan awan <10%) sehingga menghasilkan hasil analisis yang akurat. Hasil analisis stok karbon pada masing-masing tahun, kemudian dianalisis perubahan stok karbonnya. Selanjutnya nilai stok karbon dikonversikan ke CO₂.

Persediaan gas rumah kaca (dan emisi) sering dilaporkan dalam satuan setara karbon dioksida (CO₂), atau CO₂e. Konvensi ini karena CO₂ adalah bentuk karbon rumah kaca yang paling umum. Deforestasi dan degradasi hutan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang didominasi oleh CO₂, dengan gas jejak lainnya seperti CH₄ juga dilepaskan (Guild *et al.*, 2004)

Total stok karbon dapat dikonversi menjadi CO₂e dengan mengalikan densitas karbon atau persediaan sebesar 3,67. Ini adalah rasio berat molekul antara karbon dioksida [44] dan karbon [12]. Pelepasan CO₂e dianggap konservatif, karena kehilangan karbon dalam bentuk CH₄ dan gas rumah kaca lainnya memiliki potensi pemanasan global yang lebih tinggi daripada CO₂ (Kauffman & Donato, 2012).

Konversi karbon ke CO₂e = *Total ecosystem carbon stock* X 3,67(30)



BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Kondisi Mangrove

Penelitian ini dilakukan di pesisir selatan Kabupaten Pamekasan. Area mangrove yang ada di pesisir Kabupaten Pamekasan meliputi Kecamatan Tlanakan, Pademawu, Galis dan Larangan. Pesisir selatan berhubungan dengan Selat Madura yang cenderung terlindungi dan ombak lebih kecil. Sedangkan wilayah utara Kabupaten Pamekasan tidak terdapat mangrove. Kondisi pantai berkarang, sehingga mangrove sulit untuk tumbuh. Selain itu wilayah utara berhubungan langsung dengan laut Jawa, yang memiliki gelombang cenderung lebih besar dibandingkan pesisir selatan.

Luas mangrove di pesisir selatan Pamekasan sebesar 580,3 ha, yang terbagi atas Kecamatan Tlanakan 38,8 ha (6,69%), Kecamatan Pademawu 388,5 ha (66,96%), Kecamatan Galis 141,3 ha (24,35 %) dan Kecamatan Larangan 11,6 ha (2%) (Tabel 17). Kecamatan Pademawu mempunyai mangrove yang luas karena pada wilayah ini terdapat delta yang merupakan muara dari sungai Pademawu, sehingga mangrove dapat tumbuh subur. Kondisi mangrove pada wilayah penelitian dapat dilihat pada Gambar 35.

Tabel 17. Luas mangrove di Kabupaten Pamekasan

No	Kecamatan	Luas (m ²)	Luas (ha)	%
1	Tlanakan	388.347,2	38,8	6,69
2	Pademawu	3.885.446,3	388,5	66,96
3	Galis	1.413.181,4	141,3	24,35
4	Larangan	116.125,2	11,6	2,00
		5.803.100,0	580,3	100,00

Sumber : Analisi Citra Sentinel-2 (25 Juli 2017)



BAB III. KERANGKA KONSEP PENELITIAN

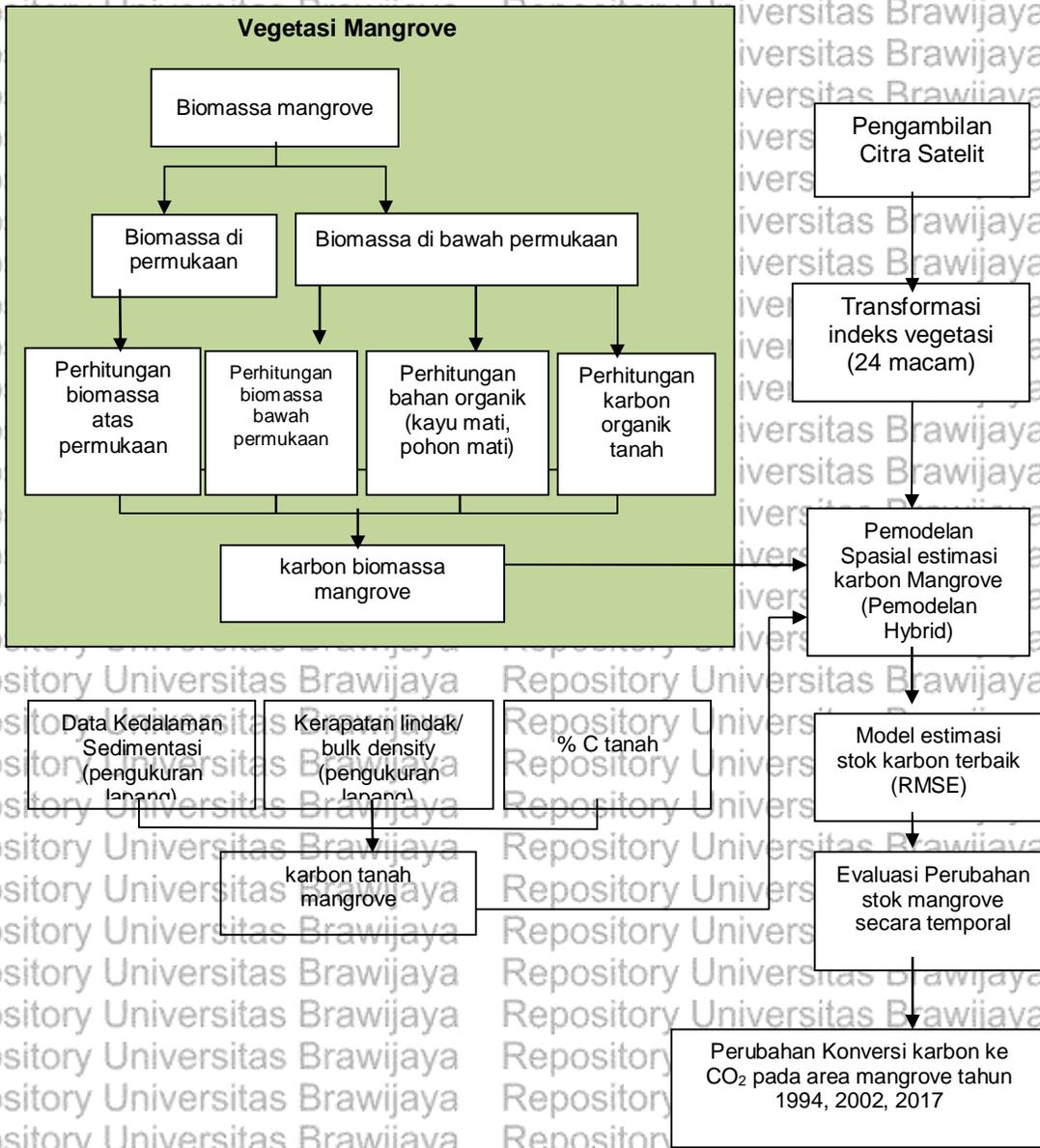
3.1. Kerangka Konseptual

Akibat pembakaran bahan bakar fosil (bahan bakar minyak dan batu bara), perubahan alih fungsi hutan dan kebakaran hutan. Hal tersebut mengakibatkan meningkatnya kandungan karbondioksida di atmosfer. Mangrove sebagai hutan pesisir, mempunyai peran yang besar dalam penyerapan karbondioksida (CO_2) dari udara. Melalui proses fotosintesis dalam daun dan hasilnya disimpan dalam jaringan tumbuhan dalam bentuk karbohidrat, tumbuhan dapat mengurangi karbondioksida di atmosfer (CO_2). Hasil fotosintesis disimpan dalam biomassa. Biomassa mangrove disimpan dalam daun, batang, akar, serasah, kayu mati/pohon mati dan tanah yang merupakan kantong penyimpanan karbon. Mangrove menyimpan karbon empat kali lebih cepat dari hutan tropis. Bahan organik pada tanah mangrove yang tinggi menyebabkan penyimpanan karbon di bawah tanah lebih tinggi daripada di atas tanah. Melalui siklus hara dan respirasi CO_2 di lepaskan udara. Jika kondisi hutan terganggu akibat perubahan lahan akan berdampak signifikan terhadap supley CO_2 di atmosfer. Lebih jelasnya kerangka konseptual penelitian dapat dilihat pada Gambar 24.

Penelitian ini mencoba melakukan estimasi stok karbon mangrove dengan pendekatan pemodelan *hybrid* penginderaan jauh. Pendekatan penginderaan jauh yang dipergunakan adalah indeks vegetasi. Indeks vegetasi yang dipergunakan ada 24 macam, dari semua indeks vegetasi ini dicari indeks vegetasi mana yang paling akurat untuk menduga biomassa mangrove (Gambar 25). Biomassa mangrove (daun, batang, akar, pohon mati, kayu mati, tanah) dihitung dengan menggunakan metode alometrik (Gambar 26).

Pada penelitian ini mencari model terbaik untuk estimasi karbon mangrove dengan beberapa pemodelan, yaitu : Pemodelan estimasi karbon total

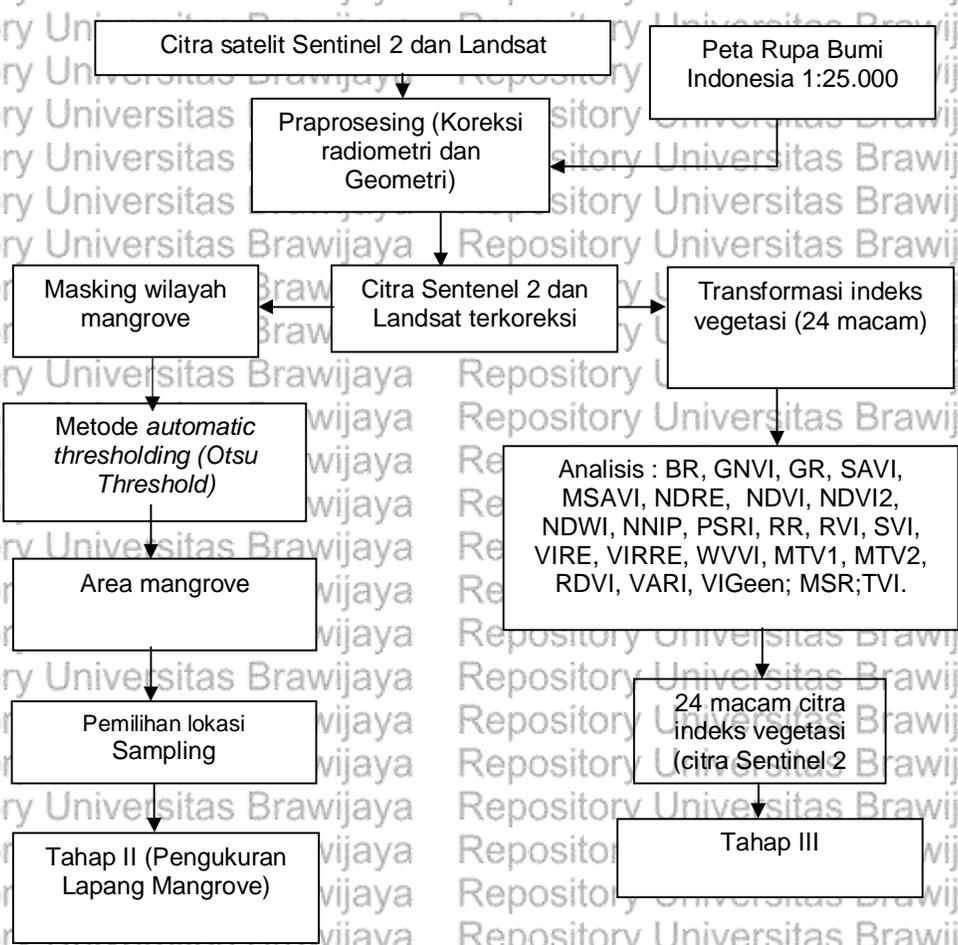
dengan indeks vegetasi (citra Sentinel-2 dan LDCM) dengan pendekatan regresi. Pemodelan *Hybrid* : Pemodelan estimasi karbon mangrove dengan memisahkan karbon biomassa dan karbon tanah. Pemodelan estimasi karbon biomassa dengan regresi non linier. Pemodelan estimasi karbon tanah dengan: (a) persamaan perhitungan karbon tanah, (b) model regresi non linier, (c) model regresi berganda. Model terbaik dipergunakan untuk evaluasi perubahan stok karbon mangrove temporal di Pulau Madura. Juga dilakukan konversi karbon ke CO₂ pada area mangrove tahun 1994, 2002, 2017



Gambar 24. Kerangka Konsep Penelitian

3.2. Kerangka Operasional

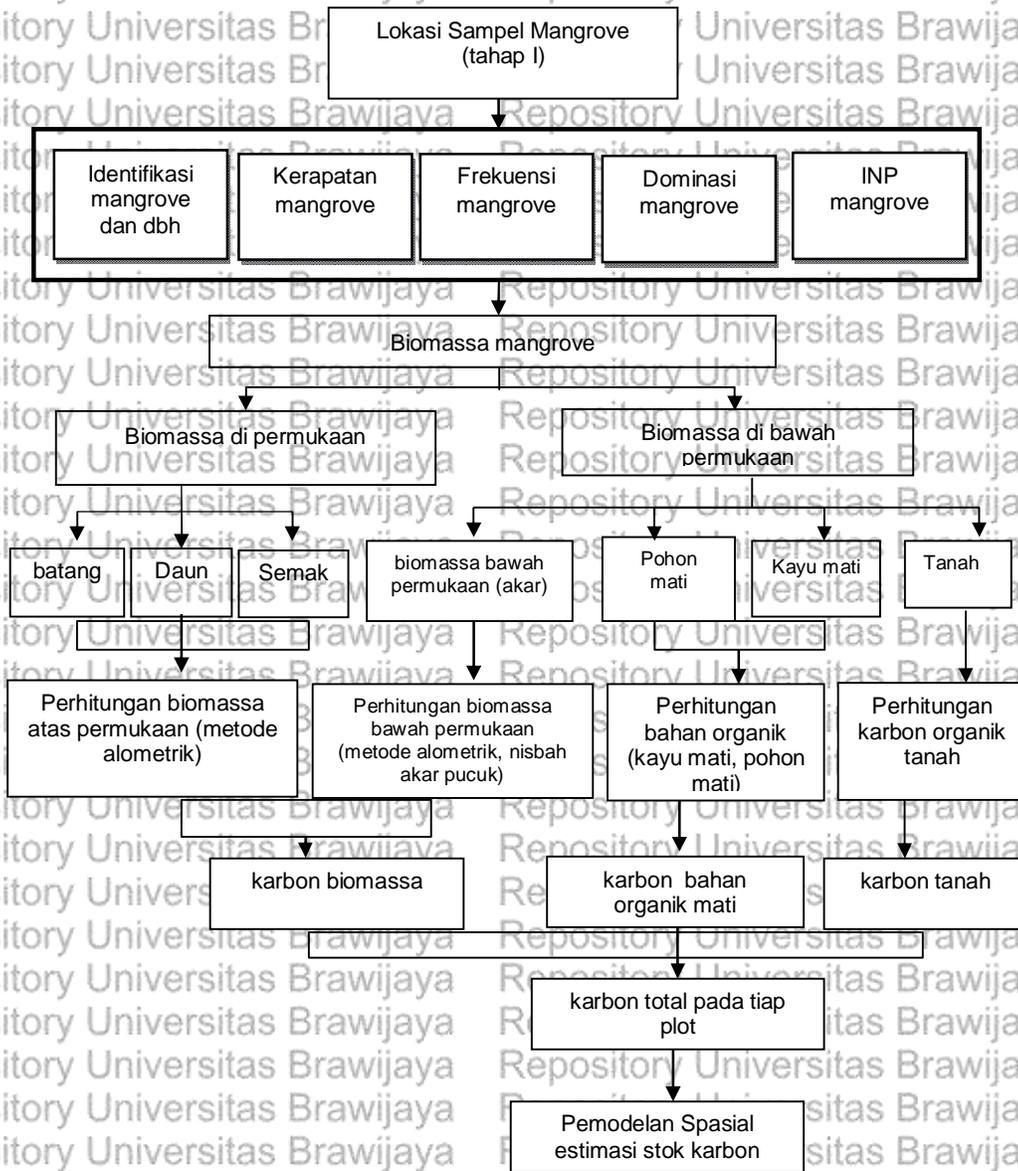
1) **Kerangka Operasional Tahap I** : Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode indeks vegetasi dan masking wilayah mangrove



Gambar 25. Kerangka Operasional Penelitian Tahap I.



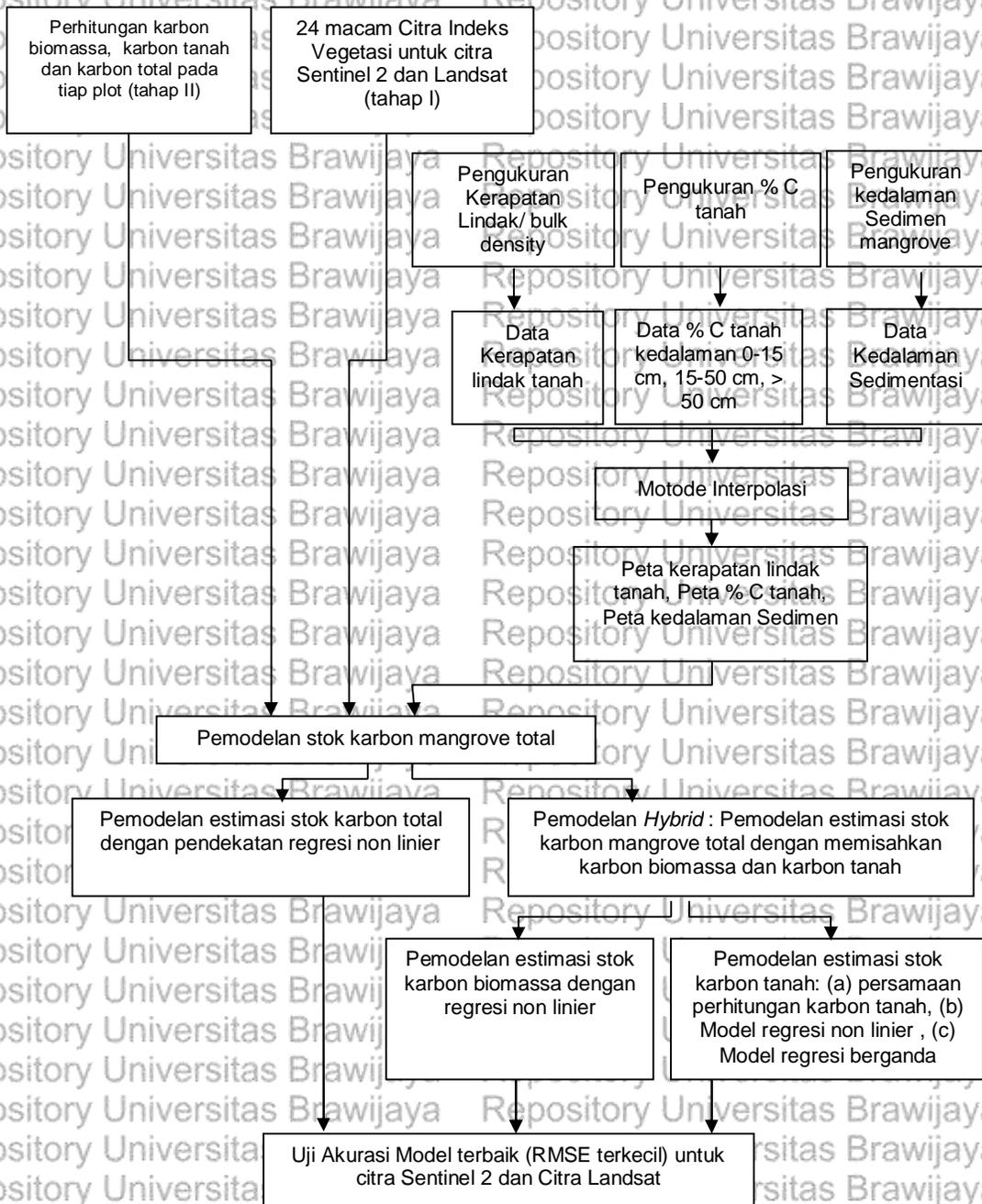
2) Kerangka operasional tahap II: Pengukuran lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove



Gambar 26. Kerangka Operasional Penelitian Tahap II



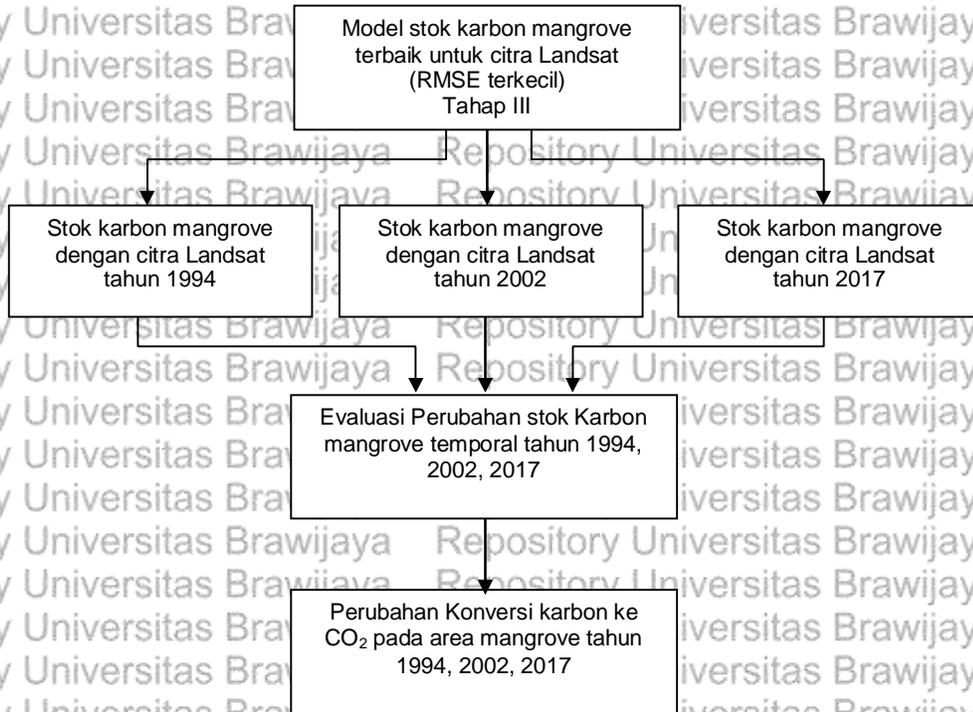
3) Kerangka Operasional Tahap III : Pemodelan *hybrid* estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat



Gambar 27. Kerangka Operasional Penelitian Tahap III



4) Kerangka Operasional Tahap IV : Evaluasi perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017.



Gambar 28. Kerangka Penelitian Operasional Tahap IV.

Tabel 12. Tahapan penelitian

Analisis	Output	Sumber
Tahap I		
- Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode indeks vegetasi dan masking wilayah mangrove		
- Praprosesing koreksi radiometrik dengan metode at-sensor reflectance	Citra terkoreksi radiometrik	(Lillesand <i>et al.</i> , 2004; Rees, 2012; Thenkabail, 2015)
- Koreksi geometri pada penelitian ini tidak dilakukan karena citra sudah terkoreksi.	Citra terkoreksi geometri	(Lillesand <i>et al.</i> , 2004; Rees, 2012; Thenkabail, 2015)
- Transformasi indeks vegetasi, dengan metode : BR, GNVl, GR, SAVI, MSAVI, NDRE, NDVI, NDVI2, NDWI, NNIP, PSRI, RR, RVI, SVI, VIRE, VIRRE, WVVI, MTV1, MTV2, RDVI, VARI, VIGeen, MSR, TVI	Citra indeks vegetasi dengan metode indeks vegetasi	Tabel Indeks vegetasi
- Masking wilayah mangrove dengan metode <i>hybrid</i> NDVI dan metode Otsu Threshold.	Area mangrove	(Otsu, 1979; Syamani <i>et al.</i> , 2016)
- Penentuan lokasi sampel	Lokasi sample	(Kauffman & Donato, 2012)



Analisis	Output	Sumber
<p>Tahap II</p> <p>Pengukuran lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identifikasi mangrove, dbh, kerapatan, frekuensi, INP, dominasi - Estimasi biomassa dan karbon mangrove pada permukaan dan biomassa bawah permukaan mangrove di lapang 	<p>Didapatkan identifikasi mangrove, data dbh, kerapatan, frekuensi, dan INP mangrove</p> <p>Didapatkan stok biomassa mangrove atas permukaan (batang, daun, semak), stok biomassa bawah permukaan (akar), stok bahan organik (pohon mati, kayu mati, serasah), tanah.</p> <p>Didapatkan karbon biomassa, karbon dari bahan organik mati dan karbon tanah</p> <p>Didapatkan karbon total pada masing-masing plot sampel</p>	<p>SNI survei dan pemetaan mangrove, (Manurief <i>et al.</i>, 2011)</p> <p>SNI 7724:2011; (Kauffman & Donato, 2012; Sutaryo, 2009)</p> <p>2015; Thenkabail, 2015)</p>
<p>Tahap III</p> <p>Pemodelan <i>hybrid</i> estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat</p> <p>Pemetaan kerapatan lindak tanah, % C tanah dan kedalaman sedimen dengan metode interpolasi pengukuran data lapang (data kerapatan lindak, % C tanah, pengukuran kedalaman)</p> <p>Pemodelan stok karbon mangrove.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pemodelan estimasi karbon total dengan indeks vegetasi (citra Sentinel-2 dan LDCM) dengan pendekatan regresi. 2. Pemodelan <i>Hybrid</i> : Pemodelan estimasi karbon mangrove dengan memisahkan karbon biomassa dan karbon tanah. <ul style="list-style-type: none"> - Pemodelan estimasi karbon biomassa dengan regresi non linier - Pemodelan estimasi karbon tanah: (a) persamaan perhitungan karbon tanah, (b) Model regresi non linier, (c) Model regresi berganda 	<p>Peta kedalaman sedimentasi mangrove, Peta kerapatan lindak dan peta % C tanah.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Model estimasi karbon total dengan indeks vegetasi. 2. Model estimasi biomassa dan model estimasi karbon tanah ((a) dengan persamaan perhitungan karbon tanah, (b) dengan model regresi non linier, (c) dengan model regresi berganda) 	<p>(Danoedoro <i>et al.</i>, 2015; Candra <i>et al.</i>, 2016; Li <i>et al.</i>, 2007; Wahyuni, 2014; Yu <i>et al.</i>, 2014)</p>

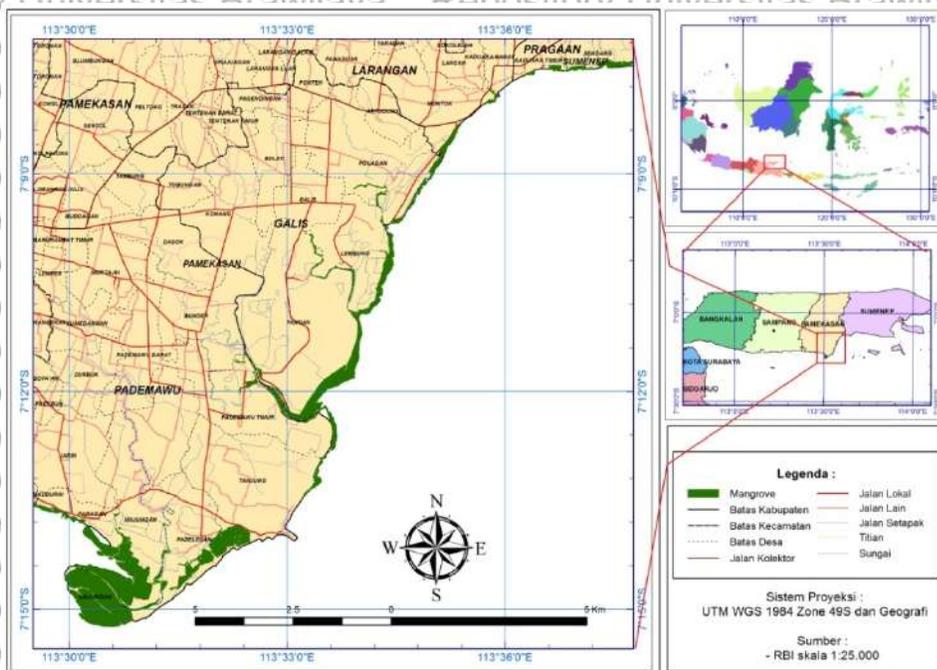
Analisis	Output	Sumber
Uji akurasi dengan RMSE dan % RMSE.	RMSE untuk semua model didapatkan model terbaik	(Alan <i>et al.</i> , 2017; Köhl <i>et al.</i> , 2006; Weng, 2010a; Kamal, 2015; Thenkabail, 2016; Chuvieco <i>et al.</i> , 2010; Alparone <i>et al.</i> , 2015; Vicharnakorn <i>et al.</i> , 2014)
Tahap IV		
Evaluasi Perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO ₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017		
Evaluasi perubahan stok karbon diakses untuk penelitian ini adalah (1) Citra Landsat 5 tahun 1994, (2) Citra Landsat 7 tahun 2002, (3) Citra Landsat 8 (LDCM) tahun 2017.	Stok karbon mangrove tahun 1994, tahun 2002 dan tahun 2017.	
Total stok karbon dapat dikonversi menjadi CO ₂ e	Konversi karbon ke CO ₂ e	(Kauffman & Donato, 2012)



BAB IV. METODE PENELITIAN

4.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian di Kabupaten Pamekasan Kecamatan Larangan, Galis, Pademawu, dan Tlanakan. Kabupaten Pamekasan terletak di Pulau Madura Provinsi Jawa Timur. Pulau Madura terdiri dari 4 kabupaten, yaitu: Kabupaten Bangkalan, Sampang, Pamekasan, dan Sumenep. Pada lokasi penelitian terdapat delta sungai Kalisemajid. Wilayah mangrove penelitian dipilih karena memiliki area mangrove yang luas dan tebal. Hasil klasifikasi citra satelit didapatkan luas area mangrove di lokasi penelitian sebesar 688 ha. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 29.



Gambar 29. Peta Lokasi Penelitian

4.2. Metode Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan terdiri dari 4 tahapan, yaitu : 1) Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode



indeks vegetasi dan masking hasil klasifikasi wilayah mangrove, 2) Pengukuran data lapang mangrove untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove, 3) Pemodelan *hybrid* untuk estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat. 4) Penerapan pemodelan untuk evaluasi perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017.

4.2.1. Tahap 1 : Analisis citra satelit Sentinel-2 dan Landsat dengan menggunakan metode indeks vegetasi dan masking wilayah mangrove

Tahapan dalam tahap 1, yaitu: a) Praprosesing koreksi radiometrik citra satelit dengan menggunakan metode *at-sensor reflectance*; b) Koreksi geometri citra tidak dilakukan karena citra sudah terkoreksi; c) Transformasi indeks vegetasi dengan 24 metode : BR, GNVI, GR, SAVI, MSAVI, NDRE, NDVI, NDVI2, NDWI, NNIP, PSRI, RR, RVI, SVI, VIRE, VIRRE, WVVI, MTV1, MTV2, RDVI, VARI, VIGeen, MSR, TVI; d) Pemisahan wilayah mangrove hasil klasifikasi dengan metode *Otsu Threshold*; f) Penentuan lokasi plot sampling.

4.2.1.1. Koreksi radiometrik

Koreksi radiometrik yang dipergunakan adalah metode *at-sensor reflectance*. Metode ini dilakukan dengan mengubah nilai piksel (*digital number*) ke *at-sensor radiance*. Kemudian dilakukan konversi ke *at-sensor reflectance*. Persamaan sebagai berikut (Danoedoro *et al.*, 2015; Lillesand *et al.*, 2004):

$$L_x = \text{offset}_x + \text{Gain}_x \times (BV)_x \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Gain}_x = (L_{\text{maks}} - L_{\text{min}}) / BV_{\text{maks}} \dots\dots\dots (2)$$

L_x adalah nilai radiansi; BV adalah *Brightness Value*; dan *Offset*, *Gain* dari perhitungan matematis nilai radiansi spektral maksimum-minimum pada metadata citra. Nilai *radiance* dirubah menjadi nilai *at-sensor reflectance* berdasarkan persamaan:

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_x \cdot d^2}{ESUN_x \cdot \cos \theta_s} \dots\dots\dots (3)$$



$$d = 1 - 0,01674 \cos(0,9856(JD - 4)) \dots \dots \dots (4)$$

- Dimana :
- ρ_P = nilai *at-sensor reflectance*;
 - L_x = nilai radianasi ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$);
 - π = 3,142857142857143;
 - d = jarak bumi-matahari (unit astronomi);
 - $ESUN_x$ = nilai spektral iradiansi matahari ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$);
 - θ_s = Sudut zenith matahari (derajat);
 - JD = *Julian Day*.

Metode *at-sensor reflectance* lebih baik dari beberapa koreksi radiometrik menggunakan metode penyesuaian histogram, kalibrasi bayangan, dan koreksi *at-surface reflectance* (Danoedoro *et al.*, 2015).

4.2.1.2. Koreksi geometri

Pada penelitian ini citra yang dipergunakan adalah citra Sentinel-2, LDCM, Landsat 7 dan Landsat 5 sudah terkoreksi geometri, sehingga tidak dilakukan koreksi geometri ulang.

4.2.1.3. Transformasi Indeks Vegetasi

Setelah citra dilakukan koreksi dilakukan tahapan selanjutnya, yaitu: 1) analisis indeks vegetasi yang mempergunakan 24 metode indeks vegetasi, 2) klasifikasi mangrove dengan menggunakan metode *Otsu Threshold*. Indeks vegetasi yang dipergunakan adalah indeks vegetasi struktur. Indeks vegetasi yang dipilih disesuaikan dengan saluran yang dimiliki citra Sentinel-2 dan Landsat. Indeks vegetasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Persamaan Indeks vegetasi yang dipergunakan pada penelitian.

No	Indeks	Persamaan	Sumber
1	BR (<i>Blue Ratio</i>)	$\left(\frac{R}{B}\right) \times \left(\frac{G}{B}\right) \times \left(\frac{RE1}{B}\right) \times \left(\frac{NIR1}{B}\right)$	(Waser <i>et al.</i> , 2014; Ng <i>et al.</i> , 2017)
2	GNDVI (<i>Green normalized difference Vegetation index</i>)	$\frac{NIR1 - G}{NIR1 + G}$	(Gitelson & Merzlyak, 1997)
3	GR (<i>Green Ratio</i>)	$\frac{G}{R}$	(Waser <i>et al.</i> , 2014)
4	SAVI (<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>)	$\frac{(1 + 0.2) * (NIR1 - NIR2)}{(NIR1 + NIR2) + 0.2}$	(Huete, 1988; Roujean & Breon, 1995; Haboudane <i>et al.</i> , 2004)



No	Indeks	Persamaan	Sumber
5	MSAVI(modified SAVI)	$\frac{1}{2} \sqrt{2 * NIR1 + 1} \sqrt{(2 * NIR1 + 1)^2 - 8 * (NIR1 - R)}$	(Qi <i>et al.</i> , 1994)
6	NDRE (Normalized difference Red-Edge index)	$\frac{NIR1 - RE}{NIR1 + RE}$	(Eitel <i>et al.</i> , 2011; Ramoelo <i>et al.</i> , 2015)
7	NDVI (normalized difference vegetation index)	$\frac{NIR1 - R}{NIR1 + R}$	(Rouse <i>et al.</i> , 1973; Pettorelli <i>et al.</i> , 2011; Gitelson & Merzlyak, 1997)
8	NDVI2 (normalized difference vegetation index)	$\frac{NIR2 - R}{NIR2 + R}$	(Rouse <i>et al.</i> , 1973)
9	NDWI (Normalized Difference Water Index)	$\frac{G - NIR1}{G + NIR1}$	(Gao, 1996)
10	NNIP (Normalized Near Infrared)	$\frac{NIR1}{(NIR1 + R + G)}$	(Sripada <i>et al.</i> , 2005; Ng <i>et al.</i> , 2017)
11	PSRI (Plant Senescence Reflectance Index)	$\frac{R - B}{RE1}$	(Merzlyak <i>et al.</i> , 1999)
12	RR (Red Ratio)	$\left(\frac{NIR1}{R}\right) \times \left(\frac{G}{R}\right) \times \left(\frac{NIR1}{RE1}\right)$	(Waser <i>et al.</i> , 2014)
13	RVI (Ratio Vegetation index)	$\frac{NIR1}{R}$	(Broge & Leblanc, 2001)
14	SVI (Sentinel Improved Vegetation Index)	$\frac{NIR2 - R}{NIR2 + R}$	(Ng <i>et al.</i> , 2017)
15	VIRE (Vegetation Index based on RedEdge)	$\frac{10.000 - NIR1}{RE1^2}$	(Ng <i>et al.</i> , 2017)
16	VIRRE (Vegetation Index Ratio based on RedEdge)	$\frac{NIR1}{RE1}$	(Ng <i>et al.</i> , 2017)
17	WVVI (World View Improved Vegetative Index)	$\frac{NIR2 - RE1}{NIR2 + RE1}$	(Wolf, 2012)
18	MTV (Modified Triangular Vegetation Index 1)	$1,2 * [1,2 * (NIR - G) - 2,5 * (R - G)]$	(Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
19	MTV 2 (Modified Triangular Vegetation Index 2)	$1,5 * (1,2 * (NIR + G) - 2,5 * (R + G)) \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - (6 * NIR - 5 * \sqrt{R})} - 0,5$	(Haboudane <i>et al.</i> , 2004)
20	RDVI (renormalized difference vegetation index)	$[(NIR - R) / (NIR + R)^2]$	(Roujean & Breon, 1995)
21	VARI (vegetation atmospherically resistant index)	$\frac{(G - R)}{(G + R - B)}$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)
22	VI green	$\frac{(G - R)}{(G + R)}$	(Gitelson <i>et al.</i> , 2002)



No	Indeks	Persamaan	Sumber
23	MSR (<i>Modified Simple Ratio</i>)	$\frac{\left(\frac{NIR}{R}\right) + 1}{\left(\frac{NIR}{R}\right) - 1}$	(Chen, 1996; Haboudane et al., 2004)
24	TVI (<i>triangular vegetation index</i>)	$0.5 * (120 * (NIR - G)) - 200 * (R - G)$	(Broge & Leblanc, 2001)

Keterangan : Blue (B), Green (G), Red (R), Near-infrared 1 (NIR1), Near-infrared 2 (NIR2), Red Edge 1 (RE1), Red Edge 2 (RE2).

4.2.1.4. Masking wilayah mangrove

Masking wilayah mangrove bertujuan untuk memisahkan wilayah mangrove dengan wilayah yang bukan mangrove. Metode yang dipergunakan adalah metode *hybrid* NDVI dengan mendeteksi hutan mangrove dan bukan menggunakan nilai *threshold* dari NDVI. Metode *automatic thresholding* yang dipergunakan adalah *Otsu Threshold*. Metode ini diformulasikan oleh Professor Nobuyuki Otsu dari Tokyo University tahun 1979 (Otsu, 1979). Metode ini secara otomatis dapat memisahkan antara vegetasi yang kecil (semai), pancang dan

pohon. Persamaan *Otsu Threshold* :

$$\begin{cases} \sigma^2 = P_{nw} \cdot (M_{nw} - M)^2 + P_w \cdot (M_w - M)^2 \\ M = P_{mw} \cdot M_{nw} + P_w \cdot M_w \\ P_{nw} + P_w = 1 \end{cases}$$

$$t^* = ArgMax\{P_{nw} \cdot (M_{nw} - M)^2 + P_w \cdot (M_w - M)^2\} \dots\dots\dots (5)$$

- Keterangan :
- σ^2 = varian di dalam kelas perairan maupun bukan perairan
 - Pnw = probabilitas nilai pixel untuk masuk kelas bukan perairan
 - Pw = probabilitas nilai pixel untuk masuk kelas perairan
 - Mnw = rata-rata nilai pixel kelas bukan perairan
 - Mw = rata-rata nilai pixel kelas perairan
 - M = rata-rata nilai pixel citra NDVI
 - t* = nilai threshold

Dalam penelitian ini penentuan *otsu Threshold* ini dengan menggunakan software Fiji.



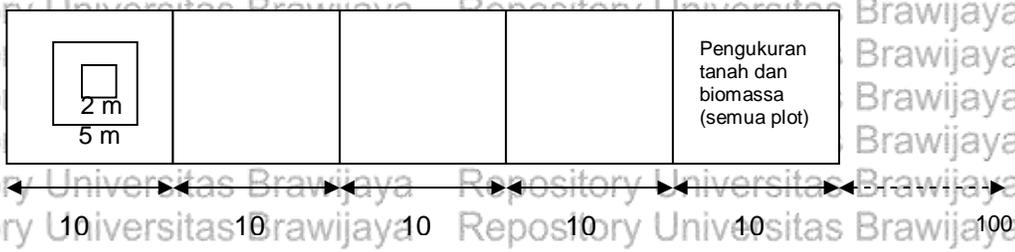
4.2.1.5. Penentuan lokasi sampel

Tahap selanjutnya menentukan titik-titik sampel untuk pengambilan data lapangan pengukuran pohon, pancang, kayu mati, tumbuhan bawah/sampah dan tanah. Jumlah plot yang dibutuhkan harus dihitung sebagai berikut:

$$\text{jumlah minimum plot sampel } (n) = \left(\frac{t \cdot s}{E}\right)^2 \dots \dots \dots (6)$$

keterangan:

- n = jumlah plot sampel,
- t = sampel statistik dari t-distribusi untuk interval kepercayaan 95%, t biasanya ditetapkan pada 2, ukuran sampel tidak diketahui;
- s = standar deviasi yang diharapkan atau diketahui dari data sebelumnya atau awal;
- E = kesalahan yang diperbolehkan atau diinginkan setengah lebar dari selang kepercayaan, dihitung dengan mengalikan stok karbon rata-rata dengan presisi yang diinginkan, yaitu berarti * 0,1 (untuk 10% presisi)(Kauffman & Donato, 2012).



Gambar 30. Desain pengambilan sampel lapangan di transek untuk memperkirakan karbon di atas dan di bawah tanah yang dimodifikasi (Murdiyarso et al., 2009; Kauffman & Donato, 2012; Hairiah, et al., 2001)

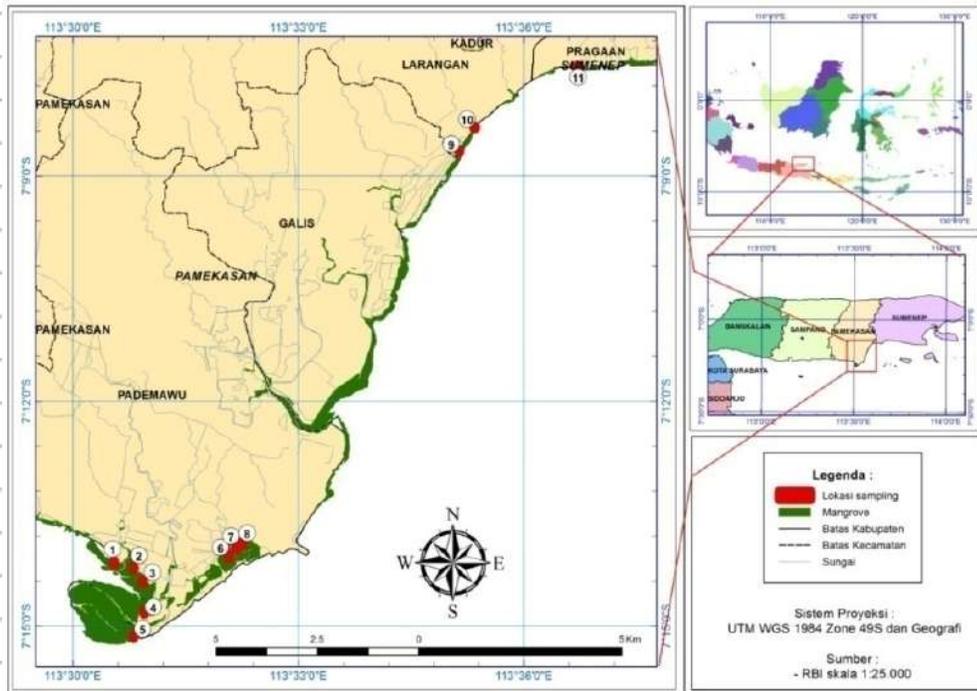
Penelitian ini dalam penentuan plot sampel menggunakan metode *stratified random sampling*. Penentuan stratifikasi berdasarkan kondisi volume tegakan biomasa mangrove dan lokasi mangrove berdasarkan mangrove muara dan mangrove laut. Jumlah startifikasi dalam penelitian terdapat 11 stasiun. Pada masing-masing stasiun/strata terdapat 10 plot. Desain plot pada setiap stasiun seperti pada Gambar 30. Total jumlah plot sampel pada penelitian ini terdapat 110 plot. Jenis mangrove berdasarkan lokasi penelitian dibagi menjadi mangrove



muara dan mangrove laut. Lokasi mangrove muara pada stasiun 1, 2, 3, 4, 5 dan untuk stasiun mangrove laut pada stasiun 6, 7, 8, 9, 10, 11 (Gambar 31).

Menghitung stok karbon hutan yang beranekaragam perlu distratifikasi. Tujuan stratifikasi adalah membedakan kondisi tegakan berdasarkan perbedaan volume biomassa, sehingga meningkatkan ketelitian. Penerapan stratifikasi awal menggunakan data citra penginderaan jauh sehingga meningkatkan akurasi dan efektifitas biaya (Stringer *et al.*, 2015; Jones *et al.*, 2014; Eckert *et al.*, 2011; Hamdan *et al.*, 2013)

Metode stratified sampling disarankan untuk inventarisasi karbon di hutan tropis Indonesia karena memiliki variasi stok karbon yang sangat tinggi. Pada setiap stratifikasi dilakukan pengukuran karbon dengan menempatkan plot-plot pengukuran. Metode *stratified random sampling* menghasilkan pendugaan yang lebih teliti dibandingkan metode lain (Wibowo, 2010; Lugina *et al.*, 2011).

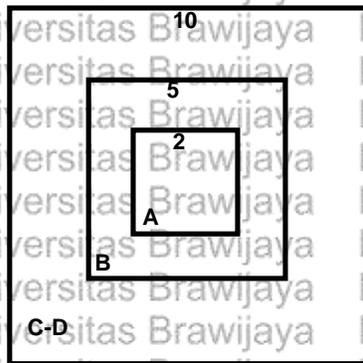


Gambar 31. Titik sampel di Desa Manjungan Kecamatan Pademawu Kabupaten Pamekasan.



4.2.2. Tahap II : Pengukuran lapang untuk perhitungan biomassa dan karbon mangrove

Pada tahap awal setelah menentukan lokasi titik sampel, maka menentukan ukuran plot. Ukuran plot/petak dalam penelitian ini disesuaikan dengan pixel pada citra sentinel-2 yang dipergunakan yaitu 10x10 m. Plot sebagai berikut: a) Semai luasan minimal 4 m²; b) Pancang luasan minimal 25 m²; c) Tiang luasan minimal 100 m²; d) Pohon luasan minimal 100 m². Bentuk dan ukuran plot lihat Gambar 32.



Keterangan gambar :

A : sub plot untuk semai, serasah, tumbuhan bawah

B : sub plot untuk pancang

C-D : sub plot untuk tiang dan pohon

Gambar 32. Contoh bentuk plot persegi

4.2.2.1. Identifikasi mangrove, dbh, kerapatan, frekuensi, INP, dominasi

Pada tahap awal dilakukan identifikasi jenis mangrove. Identifikasi ini berdasarkan panduan pengenalan mangrove di Indonesia yang dibuat oleh Wetlands International dan Ditjen PHKA. Pohon mangrove memiliki banyak kesamaan, pengamatan difokuskan pada perbedaan kulit kayu, tipe akar serta bunga/buahnya. Jika waktu pengamatan tidak memungkinkan, dilakukan dengan mengambil daun, bunga, dan buah dari pohon yang akan diidentifikasi (Noor et al., 1999; Tomlinson, 1986).

Struktur vegetasi mangrove ditentukan dengan menganalisis parameter dalam SNI 7717:2011 tentang survei dan pemetaan mangrove (Ati et al., 2014; Rachmawati et al., 2007; Manuri et al., 2013; Sutaryo, 2009), yaitu :



a. Kerapatan:

$$\text{Kerapatan Mutlak (KM)} = \frac{\sum \text{Individu suatu jenis}}{\text{Luas plot contoh}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Kerapatan Relatif (KR)} = \frac{\text{Kerapatan mutlak suatu jenis}}{\sum \text{Total kerapatan mutlak jenis}} \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

b. Frekuensi

$$\text{Frekuensi Mutlak (FM)} = \frac{\sum \text{Plot yang ditempati suatu jenis}}{\sum \text{Seluruh plot contoh}} \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Frekuensi Relatif (FR)} = \frac{\text{Frekuensi suatu jenis}}{\text{Frekuensi total seluruh jenis}} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

c. Dominasi

$$\text{Dominasi Mutlak (DM)} = \frac{\text{Luas basal area suatu jenis } (\frac{1}{4}\pi d^2)}{\text{Luas area penelitian}} \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{Dominasi Relatif (DR)} = \frac{\sum \text{Dominansi suatu jenis}}{\sum \text{Dominansi seluruh jenis}} \times 100\% \dots\dots\dots (12)$$

d. Indeks Nilai Penting

$$\text{Untuk pohon : INP} = \text{KR} + \text{FR} + \text{DR} \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{Untuk pancang dan semai : INP} = \text{KR} + \text{FR} \dots\dots\dots (14)$$

4.2.2.2. Estimasi biomassa dan karbon mangrove pada permukaan dan biomassa bawah permukaan mangrove di lapang

Pengukuran biomassa mangrove menggunakan SNI 7724:2011 tentang

pengukuran dan perhitungan stok karbon—pengukuran lapangan untuk

penaksiran stok karbon hutan (Kauffman & Donato, 2012; Bismark *et al.*, 2008;

Dharmawan & Siregar, 2008; Dharmawan, 2010).

1) Pengukuran biomassa di atas permukaan tanah

a. Pengukuran biomassa pohon, tahapan pengukuran biomassa pohon

dilakukan sebagai berikut:

- identifikasi nama dan jenis pohon mangrove;

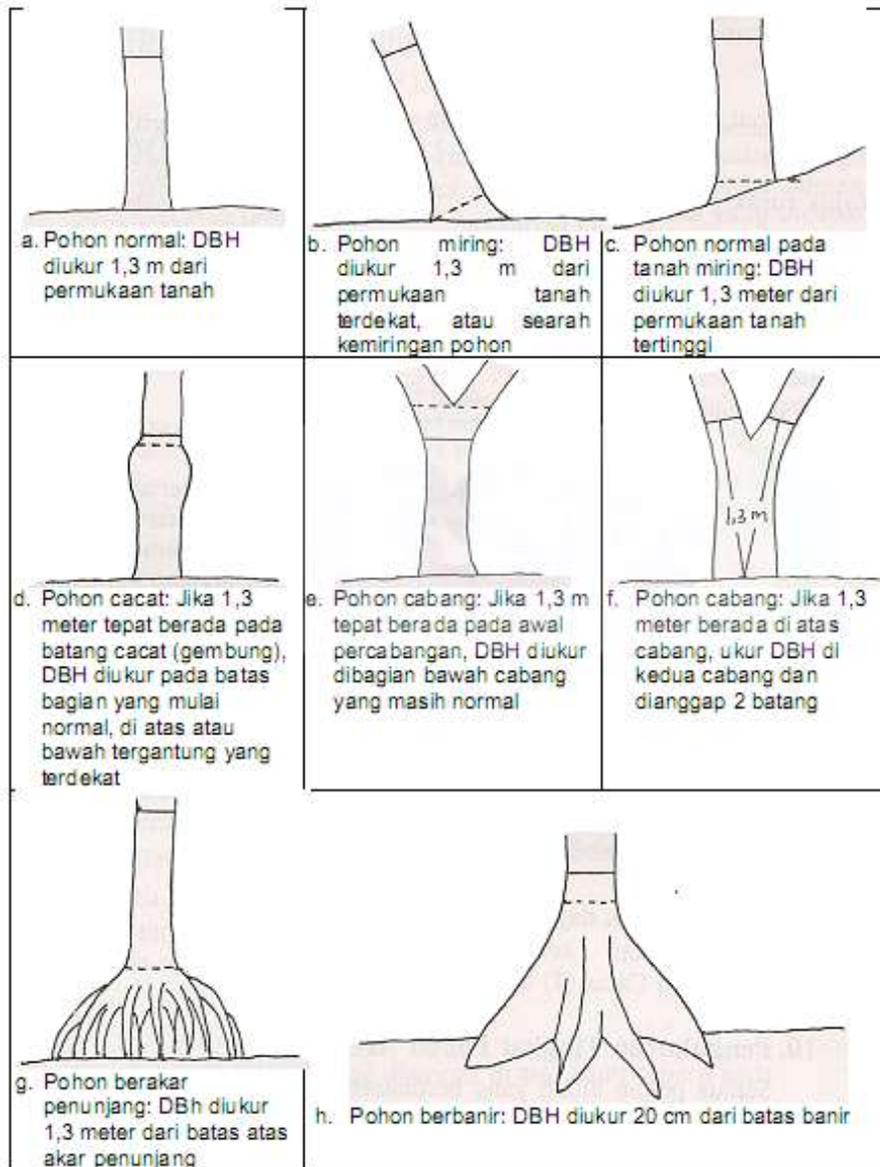
- ukur diameter setinggi dada (dbh) setiap pohon mangrove dalam petak;

- catat data dbh dan nama jenis ke dalam lembar perhitungan;



hitung biomassa pohon mangrove.

Pengukuran diameter setinggi dada (dbh) pada kondisi pohon mangrove di lapangan dapat mengacu pada Gambar 33. Dalam penelitian ini untuk menduga biomassa pohon mangrove menggunakan persamaan alometrik dari beberapa penelitian sebelumnya. Persamaan alometrik yang dipergunakan dapat dilihat pada Tabel 14.



Gambar 33. Pengukuran diameter setinggi dada pada berbagai kondisi pohon(SNI 7724:2011) (Hairiah *et al.*, 2001).



Tabel 14. Persamaan Alometrik untuk pendugaan biomassa pohon mangrove.

No	jenis	Persamaan	Sumber
1	<i>Avicennia marina</i>	$W = 0,1848(\text{DBH})^{2,3524}$ $R^2 = 0,9839, n=47, \text{DBH max}=35,2$	(Dharmawan & Siregar, 2008)
2	<i>Avicennia germinans</i>	$W = 0,140 (\text{DBH})^{2,40}$ $R^2 = 0,97, n = 25, \text{Dmax}= 42 \text{ cm},$	(Fromard <i>et al.</i> , 1998)
3	<i>Laguncularia racemosa</i>	$W = 103,3 (\text{DBH})^{2,5}$ $R^2 = 0,97, n = 70, \text{Dmax} = 10 \text{ cm},$	(Fromard <i>et al.</i> , 1998)
4	<i>Rhizophora apiculata</i>	$W=0,0695 (\text{DBH})^{2,644}$ $R^2=0,89, n=191, \text{DBH max} = 60$	(Kauffman & Cole, 2010)
5	<i>Rhizophora mangle</i>	$W = 0,722 (\text{DBH})^{1,731}$ $R^2 = 0,94, n = 14, \text{Dmax} = 20 \text{ cm},$	(Smith & Whelan, 2006)
6	<i>Rhizophora stylosa</i>	$\log W = -0,696 + 2,465 \log (\text{DBH})$ $R^2 = 1, n = 6, \text{DBH} = - \text{cm},$	(Comley & McGuinness, 2005)
7	<i>Rhizophora candelaria</i>	$W=3,3512 (\text{DBH})^{0,7652}$ $R^2=0,888, n=270, \text{DBH} = 0,4-7$	(Robertson & Along, 1992)
8	<i>Rhizophora spp.</i> (mangle dan <i>racemosa</i>)	$W = 128,2 (\text{DBH})^{2,60}$ $R^2 = 0,92, n = 9, \text{Dmax} = 32 \text{ cm},$	(Fromard <i>et al.</i> , 1998)
9	<i>Bruguiera gymnorhiza</i>	$W=0,0754 (\text{DBH})^{2,505}$ $R^2=0,91, n=326, \text{DBH max}=132 \text{ cm}$	(Kauffman & Cole, 2010)
10	<i>Bruguiera parviflor</i>	$W=0,1679 (\text{DBH})^{2,4167}$ $R^2=0,993, n=16, \text{DBH} = 2-21 \text{ cm}$	(Robertson & Along, 1992)
11	<i>Bruguiera exaristata</i>	$\log W = -0,643 + 1,141 \log (\text{DBH})$ $R^2 = 0,99, n = 10, \text{DBH} = -$	(Comley & McGuinness, 2005)
12	<i>Ceriops tagal var. australis</i>	$W=0,1885 (\text{DBH})^{2,3379}$ $R^2=0,989, n=26, \text{DBH} = 2-8 \text{ cm}$	(Robertson & Along, 1992)
13	<i>Xylocarpus granatum</i>	$W=0,0823 (\text{DBH})^{2,5883}$ $R^2=0,994, n=15, \text{DBH} = 3-17 \text{ cm}$	(Robertson & Along, 1992)
14	<i>Sonneratia apetala</i>	$W = 2,835 (\text{DBH})^{3,214}$	(Lunstrum & Chen, 2014)
15	<i>Sonneratia alba</i>	$W = 0,3841 (\text{DBH})^{2,101}$ $R^2=0,98; N=104, \text{DBH max}=323 \text{ cm}$	(Cole <i>et al.</i> , 1999; Kauffman & Cole, 2010)
	umum	$W = 0,251p*(\text{DBH})^{2,46}$ $R^2 = 0,98, n = 104, \text{DBH mas}=49$ $W=p*\exp(-1,349+1,980\ln(\text{DBH})+0,207*(\ln(\text{DBH}))^2-0,0281(\ln(\text{DBH}))^3)$ $R^2 = 0,45, n = 69, \text{DBH max}=42 \text{ cm}$ $W=0,168*p*(\text{DBH})^{2,471}$ $R^2=0,99, n=84, \text{DBH max}=42 \text{ cm}$	(Komiya <i>et al.</i> , 2005) (Chave <i>et al.</i> , 2005) (Chave <i>et al.</i> , 2005); (Komiya <i>et al.</i> , 2008)

b. Pengukuran biomassa tumbuhan bawah.

Pengukuran biomassa tumbuhan bawah dengan tahapan sebagai berikut: dengan menggunakan gunting stek potong semua bagian tumbuhan bawah di atas permukaan tanah, dalam area plot timbang berat basah total tumbuhan bawah, sebanyak ± 300 gram ambil dan timbang berat basah tumbuhan sebagai contoh; lakukan pengeringan dengan menggunakan oven di laboratorium



dengan kisaran suhu 70 °C sampai dengan 85 °C hingga mencapai berat konstan; timbang berat kering tumbuhan bawah; lakukan analisis karbon organik di laboratorium untuk melihat stok karbonnya (SNI 7724:2011);

2) **Pengukuran biomassa serasah**, dalam SNI 7724:2011 menjelaskan bahwa pengukuran serasah untuk tipe nisbah akar pucuk mangrove tidak dilakukan pada penelitian ini. Hal tersebut karena faktor pasang surut air laut yang menyebabkan serasah yang diukur sepenuhnya bukan berasal dari tegakan mangrove pada lokasi tersebut. Kauffman & Donato (2012) menjelaskan *vegetasi understory* (misalnya bibit dan tumbuhan) umumnya diabaikan di hutan bakau dan pengukuran untuk stok karbon biasanya tidak diperlukan.

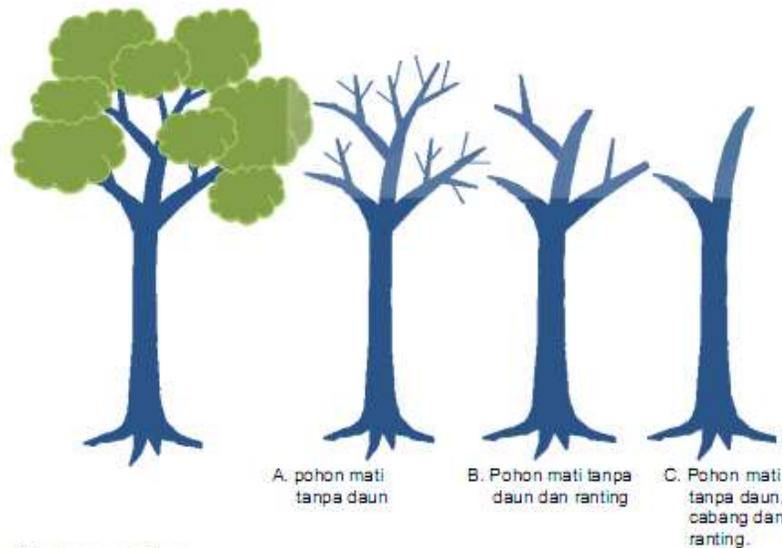
3) **Pengukuran biomassa pohon mati dan kayu mati (*necromass*)**,

a. **Pengukuran biomassa pohon mati**. Penelitian ini pengukuran biomassa pohon mati menggunakan metode alometrik. Tahapan pengukuran biomassa pohon mati dengan metode alometrik sebagai berikut:

- Pengukuran dbh pohon mati;

- Penentuan tingkat keutuhan pohon mati dengan melihat Gambar 34;

- Perhitungan biomassa pohon mati dengan persamaan alometrik dikalikan dengan faktor koreksi dari tingkat keutuhan pohon mati (lihat Gambar 34).



Keterangan gambar:

A : tingkat keutuhan dengan faktor koreksi 0,9

B : tingkat keutuhan dengan faktor koreksi 0,8

C : tingkat keutuhan dengan faktor koreksi 0,7

Gambar 34. Tingkat keutuhan pohon mati (Kauffman & Donato, 2012)

b. Pengukuran biomassa kayu mati. Penelitian ini pengukuran biomassa

kayu mati berdasarkan penimbangan langsung, tahapannya sebagai berikut:

- kayu mati pada plot pengukuran dikumpulkan;
- dilakukan penimbangan berat total dari kayu mati;
- diambil contoh dan timbang minimal 300 gram;
- contoh kayu mati dilakukan pengeringan dengan menggunakan oven terhadap pada kisaran suhu 70 °C sampai dengan 85 °C hingga beratnya konstan;

- timbang berat kering contoh kayu mati.

4) Pengukuran stok karbon organik tanah, pada tanah mineral mangrove

melalui tahapan sebagai berikut (Lugina *et al.*, 2011; BSN, 2011):

- Pengambilan contoh tanah dari keempat arah mata angin dan tengah plot.



- Contoh tanah dilakukan komposit dengan mehcampurkan contoh tanah dari kelima titik dan pada kedalaman 0 - 5 cm, 15-50 cm, dan >50 cm.
- Pengambilan sampel tanah pada masing-masing titik dengan ring soil, pada kedalaman 0 - 5 cm;
- Contoh tanah dari ring soil sampler ditimbang berat basahnya di lapangan;
- Pengeringan contoh tanah dengan dianginkan di laboratorium; dan dilakukan penimbangan dan pencatatan berat;
- Dilakukan analisis berat jenis tanah dan stok karbon organik tanah.

Berat jenis tanah ditentukan dengan membagi sampel tanah oven-kering dengan volume sampel. sebagai berikut (Kauffman & Donato, 2012) :

$$\text{Berat jenis tanah (gcm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{sampel massa kering-oven (g)}}{\text{Volume sampel (m}^3\text{)}} \dots\dots\dots (15)$$

5) Pengukuran biomassa di bawah permukaan tanah/akar, dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$B_{bp} = NAP \times B_{ap} \dots\dots\dots (16)$$

Keterangan:

- B_{bp} : biomassa di bawah permukaan tanah (kg);
- NAP : nilai nisbah akar pucuk;
- B_{ap} : nilai biomassa atas permukaan (*above ground biomass*), (kg)

Tabel 15. Nisbah akar pucuk pada berbagai tipe hutan tropis

Tipe hutan	Nisbah akar pucuk	Contoh lokasi
Hutan hujan tropis	0,37	Hutan campuran Dipterocarpa di Kalimantan
Hutan yang menggugurkan daun	0,20 – 0,24	Hutan jati
Hutan daerah kering tropis	0,28 - 0,56	Hutan savana di NTT
Semak tropis	0,40	Hutan bekas kebakaran
Hutan pegunungan tropis	0,27 -0,28	Hutan wilayah dataran tinggi

Sumber data IPCC 2006 *Guideline for National Greenhouse Gas Inventories* (SNI 7724:2011)

Pada Tabel 15 nisbah akar tidak ada yang spesifik untuk mangrove. Pada penelitian ini menggunakan metode dalam Kauffman dan Donato (2012).



Persamaan umum sebagai berikut (Kauffman & Donato, 2012; Komiyama *et al.*, 2008):

$$B = 0,199 * \rho^{0,899} * (DBH)^{2,22} \dots\dots\dots (17)$$

Keterangan : B = Biomassa bawah tanah (kg),
 ρ = Berat jenis kayu (g cm^{-3}) dalam Tabel 16
 DNH diameter setinggi dada (cm).

Massa karbon akar dihitung sebagai produk dari biomassa akar dan konsentrasi akar karbon. konsentrasi karbon dari akar biasanya lebih rendah dari komponen pohon di atas tanah

Tabel 16. Berat jenis kayu untuk jenis mangrove

Jenis Mangrove	Berat jenis (g cm^{-3})
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	0,741
<i>Rhizophora apiculata</i>	1,050
<i>Rhizophora mangle</i>	0,830
<i>Sonneratia alba</i>	0,078
<i>Avicennia germinans</i>	0,661
<i>Laguncularia racemosa</i>	0,600
<i>Avicennia officinalis</i>	0,670
<i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	0,860
<i>Ceriops decandra</i>	0,960
<i>Excoecaria agallocha</i>	0,450
<i>Heritiera fomes</i>	1,074
<i>Sonneratia apetala</i>	0,559
<i>Xylocarpus granatum</i>	0,700
<i>Xylocarpus mekongensis</i>	0,725
Rata-rata	0,752

Sumber: (Kauffman & Donato, 2012)

6) Perhitungan Stok Karbon, perhitungan stok karbon didasarkan pada SNI 7724 :2011.

a) **Penghitungan biomassa atas permukaan**. Pada penelitian ini penghitungan biomassa atas permukaan berdasarkan persamaan alometrik (Tabel 14). Biomassa dihitung menggunakan persamaan alometrik yang sesuai dengan nama jenis atau kelompok jenis mangrove.

b) **Penghitungan biomassa bawah permukaan (akar)**, tahapan dilakukan dengan: pertama hitung biomassa pohon atas permukaan; hitung nisbah akar pucuk. Persamaan yang dipergunakan adalah persamaan nomor 17.



c) **Penghitungan bahan organik serasah, kayu mati dan pohon mati,**

dilakukan dengan persamaan:

$$Bo = \frac{Bks \times Bbt}{Bbs} \dots \dots \dots (18)$$

Keterangan: Bo : berat bahan organik (kg);
Bks : berat kering contoh (kg);
Bbt : berat basah total (kg);
Bbs : berat basah contoh (kg)

7) **Penghitungan karbon**, perhitungan karbon didasarkan pada SNI 7724:2011.

a) **Penghitungan karbon dari biomassa**, karbon dari biomassa

diperhitungkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Cb = B \times \% C \text{ organik} \dots \dots \dots (19)$$

Keterangan: Cb : stok karbon biomassa (kg);
B : total biomassa (kg);
%C organik : nilai persentase stok karbon sebesar 0,47 atau nilai persen karbon hasil pengukuran di laboratorium.

b) **Penghitungan karbon dari bahan organik mati (serasah, kayu mati dan pohon mati)**, sebagai berikut:

$$Cm = Bo \times \% C \text{ organik} \dots \dots \dots (20)$$

Keterangan: Cm : stok karbon bahan organik mati (kg);
Bo : total biomassa/bahan organik (kg);
%C organik : nilai persentase stok karbon sebesar 0,47 atau diperoleh dari hasil pengukuran di laboratorium

c) **Penghitungan karbon tanah**, rumus sebagai berikut:

$$Ct = Kd \times \rho \times \% C \text{ organik} \dots \dots \dots (21)$$

Keterangan: Ct : stok karbon tanah ($g \text{ cm}^{-2}$);
Kd : kedalaman contoh tanah (cm)
 ρ : kerapatan lindak (bulk density) ($g \text{ cm}^{-3}$);
% C organik : persentase stok karbon sebesar 0,47 atau dari hasil pengukuran laboratorium pada tanah kedalaman 0-5 cm, 15-50 cm, dan >50 cm.

Menghitung kolam karbon tanah, dengan menjumlahkan massa masing-masing kedalaman tanah sampel. Kolam karbon total tanah ditentukan dengan membagi horizon tanah menjadi interval kedalaman 0-



15 cm, 15-50 cm, >50 cm dan melakukan pengukuran konsentrasi karbon di setiap lapisan (Kauffman & Donato, 2012).

- 8) **Penghitungan stok karbon total pada tiap plot**, perhitungan stok karbon total didasarkan pada SNI 7724 :2011 Menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_{plot} = (C_{bap} + C_{bbp} + C_{km} + C_{pm} + C_{tanah}) \dots\dots\dots (22)$$

Keterangan: C_{plot} : total stok karbon pada plot (ton ha⁻¹);
 C_{bap} : total stok karbon biomassa atas permukaan per hektar pada plot (ton ha⁻¹);
 C_{bbp} : total stok karbon biomassa bawah permukaan per hektar pada plot (ton ha⁻¹);
 C_{km} : total stok karbon kayu mati per hektar pada plot, (ton ha⁻¹);
 C_{pm} : total stok karbon pohon mati per hektar pada plot, (ton ha⁻¹);
 C_{tanah} : total stok karbon tanah per hektar pada plot (ton ha⁻¹).

4.2.3. Tahap III : Pemodelan *hybrid* estimasi karbon menggunakan citra Sentinel-2 dan Landsat

4.2.3.1. Pemetaan kerapatan lindak tanah, % C tanah dan kedalaman sedimen dengan metode interpolation pengukuran data lapang (data kerapatan lindak, % C tanah, pengukuran kedalaman).

Pemetaan kedalaman sedimen mangrove, kerapatan lindak dan % C tanah. Parameter tersebut didapatkan dari pengukuran lapang pada semua plot pengukuran (110 plot), data tersebut adalah kedalaman sedimen (cm), kerapatan lindak (g cm⁻³), C organik tanah (%) (kedalaman 0-15 cm, 15-50 cm dan > 50 cm). Data tersebut kemudian dimodelkan untuk mendapatkan peta sebaran kedalaman sedimentasi, peta kerapatan lindak dan peta % C tanah. Metode yang dipergunakan dalam membuat peta tersebut adalah metode interpolasi. Metode interpolasi yang dipergunakan adalah metode kriging (seperti pada persamaan 27).

Kriging adalah metode estimasi dengan memberikan estimator BLUE (*Best Linier Unbiased Estimator*) dari nilai titik atau rata-rata blok. Faktor-



faktor yang mempengaruhi akurasi metode ini, yaitu: banyaknya sampel, posisi sampel, jarak antar sampel dengan titik yang akan diestimasi, kontinuitas spasial dari variabel-variabel yang terlibat. Persamaan kriging sebagai berikut (Chilès & Delfiner, 2012):

$$\hat{Z}(X_0) = m = \sum_{i=1}^k \lambda_i [Z(X_i) - m] \dots \dots \dots (23)$$

Keterangan : m = nilai mean (konstanta skalar)

λ_i = bobot $z(\lambda_i)$ untuk estimasi lokasi x . Nilai $z(\lambda_i)$ yang sama akan memiliki koefisien bobot yang berbeda untuk estimasi pada lokasi yang berbeda.

X_i = vector lokasi berbeda.

k = banyak data yang tersampel untuk estimasi.

4.2.3.2. Pemodelan stok karbon mangrove.

Tahap selanjutnya adalah untuk mencari pemodelan stok karbon mangrove terbaik (dengan akurasi paling tinggi). Beberapa pemodelan dilakukan untuk mendapatkan pemodelan terbaik, yaitu :

1) Pemodelan estimasi karbon total dengan indeks vegetasi (citra Sentinel-2 dan LDCM) menggunakan pendekatan regresi.

2) Pemodelan *Hybrid* : Pemodelan estimasi karbon mangrove dengan memisahkan karbon biomassa dan karbon tanah, yaitu :

a) Pemodelan estimasi karbon biomassa (batang, akar, tanaman bawah) dengan indeks vegetasi menggunakan pendekatan regresi non linier

b) Pemodelan estimasi karbon tanah yang dilakukan dengan beberapa model, kemudian dicari model dengan akurasi paling baik (uji RMSE paling kecil). Pemodelan tersebut yaitu:

- Pemodelan dengan menggunakan persamaan perhitungan karbon tanah (persamaan 21).

- Pemodelan dengan pendekatan regresi antara stok karbon tanah (variabel terikat) dan indeks vegetasi (variabel bebas).



Pemodelan dengan pendekatan regresi berganda antara stok karbon tanah (variabel terikat) dengan indeks vegetasi, kedalaman sedimen, kerapatan lindak dan % C tanah (variabel bebas)

Indeks vegetasi yang dipergunakan 24 jenis, kemudian dicari yang terbaik.

Mencari persamaan yang terbaik pada tahap awal dilakukan dengan melihat nilai koefisien korelasi (R) dan koefisien determinasi (R^2). Seperti dalam Danoedoro *et al.*, 2015; Candra *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2007; Wahyuni, 2014; Yu *et al.*, 2014 menggunakan analisis statistik regresi non-linear berupa nilai koefisien korelasi (R), koefisien determinasi (R^2). Tahap selanjutnya dilakukan uji RMSE.

Model analisis regresi yang digunakan adalah regresi non-linear terdiri atas eksponensial, logaritmik, polynomial, Power/geometrik untuk mendapatkan rumus. Persamaan regresi sebagai berikut (Davidson & Mackinnon, 1999):

$$\text{Eksponensial : } Y = a * e^{bX} \dots\dots\dots (24)$$

$$\text{Logaritmik : } Y = a + b * \ln(x) \dots\dots\dots (25)$$

$$\text{Polynomial : } Y = a + bX + cX^2 \dots\dots\dots (26)$$

$$\text{Power/geometrik : } Y = a * X^b \dots\dots\dots (27)$$

Model akhir didapatkan dengan mensimulasikan dari pemodelan-pemodelan yang dilakukan diatas, dengan menggabungkan antara model estimasi karbon biomassa terbaik dengan model estimasi karbon tanah terbaik.

Pemodelan dengan menggunakan metode *hybrid*. Metode *hybrid* dengan menggabungkan dua pendekatan yang berbeda, yaitu dengan menggunakan data citra satelit dan data pengukuran lapang. Sebagai contoh untuk pemetaan lahan basah oleh beberapa parameter : (1) menganalisis data citra series tahunan dari satelit dan (2) pemodelan topografi. Metode ini merangkum



berbagai dataset dengan latar belakang yang berbeda dan menggabungkan indeks berasal dari lahan digunakan bersama-sama (Gumbricht, 2015).

Pada penelitian ini tahapan akhir pemodelan dilakukan beberapa simulasi, yaitu :

1. Simulasi model dengan input nilai indeks vegetasi, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah dan % karbon tanah.
2. Simulasi model dengan input nilai indeks vegetasi, kedalaman sedimen dan kerapatan lindak.
3. Simulasi model dengan input nilai indeks vegetasi dan kedalam tanah.
4. Simulasi model dengan input hanya indeks vegetasi.

4.2.3.3. Uji akurasi model dengan RMSE.

Uji akurasi seperti yang dalam penelitian Clark *et al.*, (2011); Kulawardhana *et al.*, (2014); Cartus *et al.*, (2014); Hu *et al.*, (2016); Frananda *et al.*, (2015); Li *et al.*, (2007) menggunakan *correlation coefficient* (r) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk menentukan transformasi indeks vegetasi yang paling baik dalam memodelkan stok karbon pada mangrove. Persamaan regresi ini digunakan untuk membangun peta distribusi stok karbon berdasarkan indeks vegetasi terbaik. Persamaan RMSE sebagai berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \dots\dots\dots (28)$$

$$RMSE \% = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{y}} \dots\dots\dots (29)$$

dimana : x_i = Nilai Stok karbon hasil pengukuran, y_i =prediksi nilai stok karbon, \bar{y} = rata-rata karbon hasil pengukuran (Alan *et al.*, 2017; Köhl *et al.*, 2006; Weng, 2010a; Kamal, 2015; Thenkabail, 2016; Chuvieco *et al.*, 2010; Alparone *et al.*, 2015; Vicharnakorn *et al.*, 2014)



4.2.4. Tahap IV : Evaluasi Perubahan stok karbon mangrove dan konversi ke CO₂ secara temporal tahun 1994, 2002, 2017.

Tahapan selanjutnya adalah evaluasi perubahan stok karbon mangrove di Pulau Madura dengan memanfaatkan model estimasi stok karbon menggunakan citra satelit Landsat. Evaluasi perubahan ini memanfaatkan citra Landsat karena citra ini memiliki beberapa generasi satelit, mulai dari Landsat 1 sampai 8. Data citra untuk analisis evaluasi perubahan stok karbon mangrove pada penelitian ini adalah (1) Citra Landsat 5 tahun 1994, (2) Citra Landsat 7 tahun 2002, (3) Citra Landsat 8 (LDCM) tahun 2017. Alasan dipergunakannya citra pada tahun tersebut adalah : (1) diperlukan citra yang cukup lama (>8 tahun) sehingga mampu melihat perubahan mangrove, (2) ketersediaan citra yang memenuhi syarat (gangguan awan <10%) sehingga menghasilkan hasil analisis yang akurat. Hasil analisis stok karbon pada masing-masing tahun, kemudian dianalisis perubahan stok karbonnya. Selanjutnya nilai stok karbon dikonversikan ke CO₂.

Persediaan gas rumah kaca (dan emisi) sering dilaporkan dalam satuan setara karbon dioksida (CO₂), atau CO₂e. Konvensi ini karena CO₂ adalah bentuk karbon rumah kaca yang paling umum. Deforestasi dan degradasi hutan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang didominasi oleh CO₂, dengan gas jejak lainnya seperti CH₄ juga dilepaskan (Guild *et al.*, 2004)

Total stok karbon dapat dikonversi menjadi CO₂e dengan mengalikan densitas karbon atau persediaan sebesar 3,67. Ini adalah rasio berat molekul antara karbon dioksida [44] dan karbon [12]. Pelepasan CO₂e dianggap konservatif, karena kehilangan karbon dalam bentuk CH₄ dan gas rumah kaca lainnya memiliki potensi pemanasan global yang lebih tinggi daripada CO₂ (Kauffman & Donato, 2012).

Konversi karbon ke CO₂e = *Total ecosystem carbon stock* X 3,67(30)



citra Sentinel-2, sebagai berikut: (1) Model 1 dengan input nilai indeks vegetasi, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah dan % karbon tanah; (2) Model 2 dengan input nilai indeks vegetasi, kedalaman sedimen dan kerapatan lindak; (3) Model 3 dengan input nilai indeks vegetasi dan kedalaman sedimen; (4) Model 4 dengan input hanya indeks vegetasi. Persamaan pemodelan dengan berbagai simulasi dapat dilihat pada Tabel 47 dan 48.

Tabel 47. Pemodelan total karbon mangrove Citra LDCM dengan input ; indeks vegetasi, kedalaman sedimen, kerapatan lindak dan % C organik tanah.

No	Persamaan	Keterangan
Model 1		
1	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-97,618 + 2,740589 * X2 + 0,36241 * X3 + 40,69228 * X4 - 7325,77 * X6 + 9758,635 * X6 - 526,508 * X7)$ <p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI X2= Indeks vegetasi RDVI X3= Kedalaman sedimen (cm), X4= Kerapatan lindak (g cm⁻³), X5=% C kedalaman 0-15cm, X6=% C kedalaman 15-50 cm, X7 =% C kedalaman >15cm</p>	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 2,5307 % RMSE=9,578 Mean(ton)= 24,62 Std(ton)= 7,51 Min(ton)= 0,15 Max(ton)= 57,02
2	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-93,1961 + 14,8121 * X2 + 0,36955 * X3 + 40,1223 * X4 - 6937,07 * X5 + 9110,63 * X6 - 263,046 * X7)$ <p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI X2= Indeks vegetasi VIgreen X3= Kedalaman sedimen (cm), X4= Kerapatan lindak (g cm⁻³), X5=% C kedalaman 0-15cm, X6=% C kedalaman 15-50 cm, X7 =% C kedalaman >15cm</p>	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 2,7485 % RMSE=10,402 Mean(ton)= 24,29 Std(ton)= 7,54 Min(ton)= -0,22 Max(ton)= 57,25
3	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + ((15 * X3 * X4) + (35 * X3 * X5) + ((X2 - 50) * X3 * X6))$ <p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI X2= rata-rata kedalaman sedimen X3= rata-rata kerapatan lindak, X4=rata-rata % C kedalaman 0-15cm X5=rata-rata % C kedalaman 15-50 cm X6 =rata-rata % C kedalaman >15cm</p>	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 5,7960 % RMSE=24,123 Mean(ton)= 25,19 Std(ton)= 6,94 Min(ton)= 12,64 Max(ton)= 55,02
Model 2		
1	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-46,1009 + 69,02285 * X2 + 0,182429 * X3 + 19,40405 * X4)$	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 6,8708



No	Persamaan	Keterangan
	<p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI</p> <p>X2= Indeks vegetasi MSAVI</p> <p>X3= Kedalaman sedimen (cm),</p> <p>X4= Kerapatan lindak (g cm⁻³),</p>	<p>% RMSE=26,004</p> <p>Mean(ton)= 18,14</p> <p>Std(ton)= 11,94</p> <p>Min(ton)= -8,51</p> <p>Max(ton)= 62,36</p>
2	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-47,9258 + 1,973006 * X2 + 0,175553 * X3 + 19,34522 * X4)$ <p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI</p> <p>X2= Indeks vegetasi TVI</p> <p>X3= Kedalaman sedimen (cm),</p> <p>X4= Kerapatan lindak (g cm⁻³),</p>	<p>RMSE (ton piksel⁻¹)= 6,9386</p> <p>% RMSE=26,260</p> <p>Mean(ton)= 18,07</p> <p>Std(ton)= 12,06</p> <p>Min(ton)= -8,52</p> <p>Max(ton)= 62,67</p>
Model 3		
1	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-13,91 + 20,54032 * X2 + 0,26787 * X3)$ <p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI</p> <p>X2= Indeks vegetasi MSAVI</p> <p>X3= Kedalaman sedimen (cm),</p>	<p>RMSE (ton piksel⁻¹)= 6,6503</p> <p>% RMSE=25,169</p> <p>Mean(ton)= 24,63</p> <p>Std(ton)= 8,73</p> <p>Min(ton)= 5,66</p> <p>Max(ton)= 49,70</p>
2	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-24,4633 + 23,18259 * X2 + 0,282121 * X3)$ <p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI</p> <p>X2= Indeks vegetasi NDVI</p> <p>X3= Kedalaman sedimen (cm),</p>	<p>RMSE (ton piksel⁻¹)= 6,6573</p> <p>% RMSE=25,195</p> <p>Mean(ton)= 24,08</p> <p>Std(ton)= 9,46</p> <p>Min(ton)= 2,42</p> <p>Max(ton)= 48,08</p>

Keterangan : n (RMSE) = 30, ukuran piksel 30x30m=300m²

Tabel 48. Pemodelan total karbon mangrove dengan citra LDCM dengan input : indeks vegetasi, rata-rata kedalaman sedimen (100,63 cm), kerapatan lindak (1,02 g cm⁻³) dan % C organik tanah kedalaman 0-15 cm (0,0341), % C organik tanah kedalaman 15-50 cm (0,0303), % C organik tanah kedalaman >50 cm (0,0228).

No	Persamaan	Keterangan
Model 4		
1	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-13,91 + 20,54032 * X2 + 0,26787 * X3)$ <p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI</p> <p>X2= Indeks vegetasi MSAVI</p> <p>X3= rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm)</p>	<p>RMSE (ton piksel⁻¹)= 9,03122</p> <p>% RMSE=34,180</p> <p>Mean(ton)= 23,90</p> <p>Std(ton)= 4,27</p> <p>Min(ton)= 16,30</p> <p>Max(ton)= 44,18</p>
2	$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-93,1961 + 14,8121 * X2 + 0,36955 * X3 + 40,1223 * X4 - 6937,07 * X5 + 9110,63 * X6 - 263,046 * X7)$ <p>Keterangan :</p> <p>X1= Indeks vegetasi VARI</p> <p>X2= Indeks vegetasi VIgreen</p>	<p>RMSE (ton piksel⁻¹)= 9,28062</p> <p>% RMSE=35,123</p> <p>Mean(ton)= 23,45</p> <p>Std(ton)= 3,35</p>



No	Persamaan	Keterangan
	X3= rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm), X4= rata-rata kerapatan lindak (1,02 g cm ⁻³), X5=rata-rata % C kedalaman 0-15cm (0,0341), X6=rata-rata % C kedalaman 15-50 cm (0,0303), X7 =rata-rata % C kedalaman >15cm (0,0228)	Min(ton)= 18,42 Max(ton)= 40,89
3	$Y = (66,38 \cdot X1^{2 \cdot 10^4}) + (-24,4633 + 23,18259 \cdot X2 + 0,282121 \cdot X3)$ Keterangan : X1= Indeks vegetasi VARI X2= Indeks vegetasi NDVI X3= rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm)	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 9,28712 % RMSE=35,148 Mean(ton)= 23,31 Std(ton)= 4,98 Min(ton)= 13,93 Max(ton)= 42,32
4	$Y = (66,38 \cdot X1^{2 \cdot 10^4}) + (-47,9258 + 1,973006 \cdot X2 + 0,175553 \cdot X3 + 19,34522 \cdot X4)$ Keterangan : X1= Indeks vegetasi VARI X2= Indeks vegetasi TVI X3= rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm), X4= rata-rata kerapatan lindak (1,02 g cm ⁻³),	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 9,35484 % RMSE=35,404 Mean(ton)= 21,30 Std(ton)= 9,27 Min(ton)= 0,37 Max(ton)= 56,69
5	$Y = (66,38 \cdot X1^{2 \cdot 10^4}) + (-97,618 + 2,740589 \cdot X2 + 0,36241 \cdot X3 + 40,69228 \cdot X4 - 7325,77 \cdot X5 + 9758,635 \cdot X6 - 526,508 \cdot X7)$ Keterangan : X1= Indeks vegetasi VARI X2= Indeks vegetasi RDVI X3= rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm), X4= rata-rata kerapatan lindak (1,02 g cm ⁻³), X5=rata-rata % C kedalaman 0-15cm (0,0341), X6=rata-rata % C kedalaman 15-50 cm (0,0303), X7 =rata-rata % C kedalaman >15cm (0,0228)	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 9,39665 % RMSE=35,563 Mean(ton)= 23,70 Std(ton)= 3,10 Min(ton)= 17,03 Max(ton)= 37,63
6	$Y = (66,38 \cdot X1^{2 \cdot 10^4}) + (-46,1009 + 69,02285 \cdot X2 + 0,182429 \cdot X3 + 19,40405 \cdot X4)$ Keterangan : X1= Indeks vegetasi VARI X2= Indeks vegetasi MSAVI X3= rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm), X4= rata-rata kerapatan lindak (1,02 g cm ⁻³),	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 9,42689 % RMSE=35,677 Mean(ton)= 21,36 Std(ton)= 9,02 Min(ton)= 2,28 Max(ton)= 55,66
7	$Y = (66,38 \cdot X1^{2 \cdot 10^4}) + ((15 \cdot X3 \cdot X4) + (35 \cdot X3 \cdot X5) + ((X2 - 50) \cdot X3 \cdot X6))$ Keterangan : X1= Indeks vegetasi VARI X2= rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm), X3= rata-rata kerapatan lindak (1,02 g cm ⁻³), X4=rata-rata % C kedalaman 0-15cm (0,0341), X5=rata-rata % C kedalaman 15-50 cm (0,0303), X6 =rata-rata % C kedalaman >15cm (0,0228)	RMSE (ton piksel ⁻¹)= 21,09406 % RMSE=79,833 Mean(ton)= 5,82 Std(ton)= 2,43 Min(ton)= 2,78 Max(ton)= 20,15

Keterangan : n (RMSE)= 30, ukuran piksel 30x30m=300m²



Model terbaik citra LDCM dengan beberapa simulasi adalah sebagai berikut (luas piksel 30x30 m):

1. Model 1 merupakan gabungan model karbon biomassa menggunakan regresi power/geometri untuk indeks vegetasi VARI dengan model karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel (Indeks vegetasi RDVI (*renormalized difference vegetation index*), Kedalaman sedimen (cm), Kerapatan lindak (g cm^{-3}), %C kedalaman 0-15cm, %C kedalaman 15-50 cm, %C kedalaman >15cm). Hasil uji RMSE untuk model ini sebesar 2,53079 ton 900m^{-2} dan % RMSE sebesar 9,58%. Peta stok karbon mangrove hasil model 1 seperti pada Gambar 62. Persamaan untuk model 1 untuk cita LDCM adalah :

$$Y = (66,38*(X1^2,104))+(-97,618+2,740589*X2 +0,36241*X3+ 40,69228*X4 -7325,77*X5 +9758,635*X6 -526,508*X7)$$

Keterangan :

X1 = Indeks vegetasi VARI

X2 = Indeks vegetasi RDVI

$$\text{VARI} = \frac{(G-R)}{(G+R-B)}$$

$$\text{RDVI} = [(NIR - R)/(NIR + R)^2]$$

G = band 3 Citra LDCM

R = band 4 Citra LDCM

B = band 2 Citra LDCM

NIR = band 5 Citra LDCM

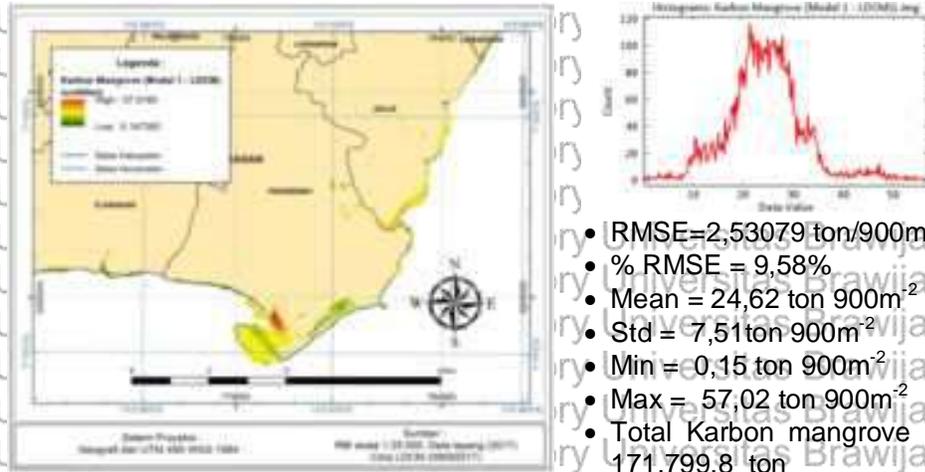
X3 = Kedalaman sedimen (cm),

X4 = Kerapatan lindak (g cm^{-3}),

X5 = % C kedalaman 0-15cm,

X6 = % C kedalaman 15-50 cm,

X7 = % C kedalaman >15cm



- RMSE=2,53079 ton/900m²
- % RMSE = 9,58%
- Mean = 24,62 ton 900m²
- Std = 7,51ton 900m²
- Min = 0,15 ton 900m²
- Max = 57,02 ton 900m²
- Total Karbon mangrove = 171.799,8 ton
- Rata-rata Karbon ha⁻¹ = 272,35 ton ha⁻¹

Gambar 62. Peta stok karbon mangrove hasil Model 1 citra LDCM

2. Model 2 merupakan gabungan model karbon biomassa menggunakan regresi power/geometri untuk indeks vegetasi VARI dengan model karbon tanah regresi berganda 3 variabel (Indeks vegetasi MSAVI (*modified Soil-Adjusted Vegetation Index*), Kedalaman sedimen (cm) dan Kerapatan lindak (g cm⁻³)). Hasil uji RMSE untuk model 2 sebesar 6,87089 ton 900m² dan % RMSE sebesar 26,004%. Peta stok karbon mangrove hasil model 2 seperti pada Gambar 63. Persamaan untuk model ini adalah :

$$Y = (66,38*(X1^{2,104})) + (-46,1009 + 69,02285*X2 + 0,182429*X3 + 19,40405*X4)$$

Keterangan :

X1 = Indeks vegetasi VARI

X2 = Indeks vegetasi MSAVI

$$VARI = \frac{(G-R)}{(G+R-B)}$$

$$MSAVI = \frac{1}{2} [2 * NIR1 + 1 + \sqrt{(2 * NIR1 + 1)^2 - 8 * (NIR1 + R)}]$$

G = band 3 Citra LDCM

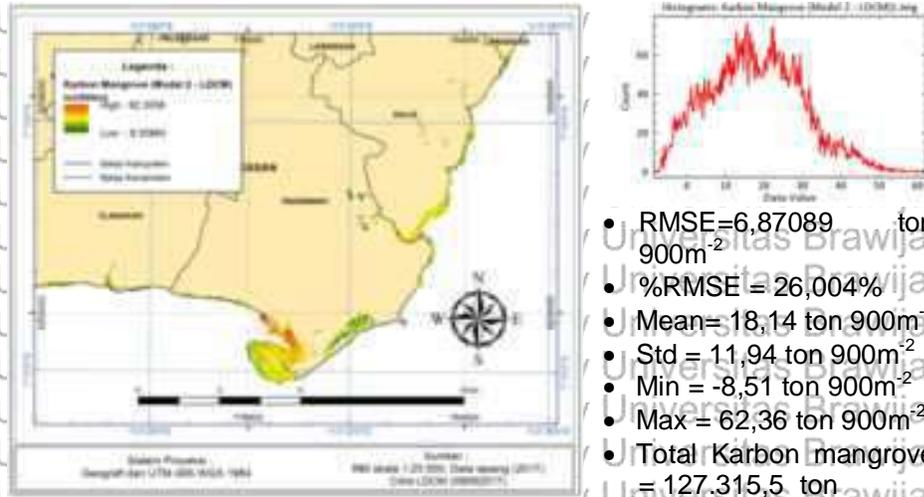
R = band 4 Citra LDCM

B = band 2 Citra LDCM

NIR = band 5 Citra LDCM

X3 = Kedalaman sedimen (cm)

X4 = Kerapatan lindak (g cm⁻³),



- RMSE=6,87089 ton 900m⁻²
- %RMSE = 26,004%
- Mean= 18,14 ton 900m⁻²
- Std = 11,94 ton 900m⁻²
- Min = -8,51 ton 900m⁻²
- Max = 62,36 ton 900m⁻²
- Total Karbon mangrove = 127,315,5 ton
- Rata-rata Karbon ha⁻¹ = 201,83 ton ha⁻¹

Gambar 63. Peta karbon mangrove hasil Model 2 citra LDCM

3. Model 3 merupakan gabungan model karbon biomassa menggunakan regresi power/geometri untuk indeks vegetasi VARI dengan model karbon tanah regresi berganda 2 variabel (Indeks vegetasi MSAVI dan kedalaman sedimen (cm)). Hasil uji RMSE mendapatkan model ini sebesar 6,65033 ton 900m⁻² dan % RMSE sebesar 25,169%. Peta stok karbon mangrove hasil model 3 seperti pada Gambar 64. Persamaan untuk model 3 adalah:

$$Y = (66,38*(X1^2,104)) + (-13,91 + 20,54032*X2 + 0,26787*X3)$$

Keterangan :

X1 = Indeks vegetasi VARI

X2 = Indeks vegetasi MSAVI

$$VARI = \frac{(G-R)}{(G+R+B)}$$

$$MSAVI = \frac{1}{2} [2 * NIR1 + 1 - \sqrt{(2 * NIR1 + 1)^2 - 8 * (NIR1 - R)}]$$

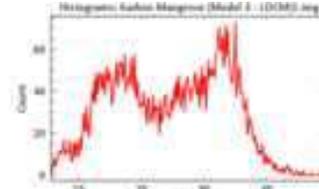
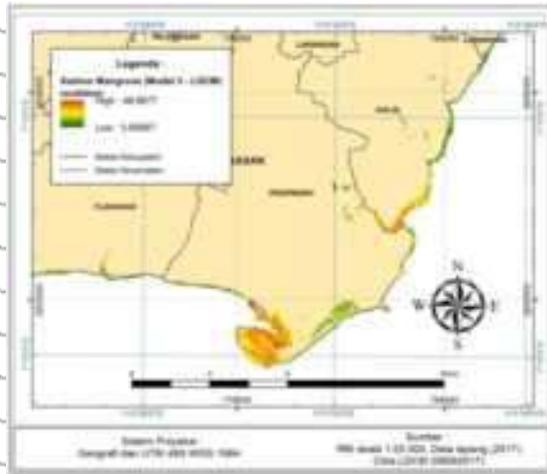
G = band 3 Citra LDCM

R = band 4 Citra LDCM

B = band 2 Citra LDCM

NIR = band 5 Citra LDCM

X3 = Kedalaman sedimen (cm),



- RMSE=6,65033 ton 900m⁻²
- % RMSE=25,169%
- Mean = 24,63 ton 900m⁻²
- Std = 8,73 ton 900m⁻²
- Min = 5,66 ton 900m⁻²
- Max = 49,70 ton 900m⁻²
- Total Karbon mangrove = 171.993,7 ton
- Rata-rata Karbon ha⁻¹ = 272,66 ton ha⁻¹

Gambar 64. Peta karbon mangrove hasil Model 3 citra LDCM

4. Model 4 data yang dipergunakan dalam model ini adalah data rata-rata kedalaman sedimen sebesar 100,63 cm, data kerapatan lindak sebesar 1,02 g/cm³, data %C tanah kedalaman 0-15cm sebesar 0,0341%, data %C tanah kedalaman 15-50 cm sebesar 0,0303 %, data %C tanah kedalaman >15cm sebesar 0,0228%. Data tersebut didapatkan dari hasil pengukuran lapang dari 38 plot lokasi sampel. Persamaan terbaik adalah karbon biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI dengan karbon tanah regresi berganda 2 variabel (indeks vegetasi MSAVI dan rata-rata kedalaman sedimen sebesar 100,63 cm). Hasil uji RMSE persamaan ini sebesar 9,03122 ton 900m⁻² dan %RMSE sebesar 34,18%. Nilai RMSE untuk semua persamaan dapat dilihat pada Tabel 50. Peta stok karbon mangrove hasil model 4 seperti pada Gambar 65. Persamaan model 4 adalah sebagai berikut:

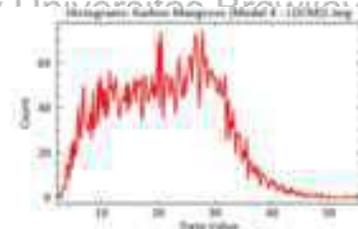
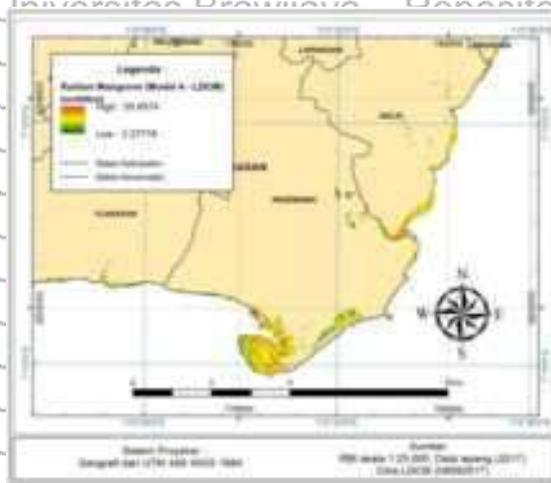
$$Y = (66,38*(X1^2,104))+(-13,91+20,54032*X2 + 0,26787*X3)$$

Keterangan:

- X1 = Indeks vegetasi VARI
- X2 = Indeks vegetasi MSAVI
- VARI = $\frac{(G-R)}{(G+R)}$
- MSAVI = $\frac{1}{2} [2 * NIR1 + 1 - \sqrt{(2 * NIR1 + 1)^2 - 8 * (NIR1 - R)}]$



- G = band 3 Citra LDCM
 R = band 4 Citra LDCM
 B = band 2 Citra LDCM
 NIR = band 5 Citra LDCM
 X3 = rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm),



- RMSE=9,03122 ton 900m⁻²
- %RMSE = 34,180%
- Mean = 21,36 ton 900m⁻²
- Std = 9,02 ton 900m⁻²
- Min = 2,28 ton 900m⁻²
- Max = 55,66 ton 900m⁻²
- Total Karbon mangrove = 148.957,6 ton
- Rata-rata Karbon ha⁻¹ = 236,14 ton ha⁻¹

Gambar 65. Peta karbon mangrove hasil Model 4 citra LDCM

Pemodelan dilakukan dengan memisahkan estimasi karbon biomassa dan karbon tanah. Pemodelan terbaik untuk estimasi karbon mangrove dengan citra LDCM adalah model 1, penggabungan antara estimasi karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi VARI (*vegetation atmospherically resistant index*) regresi power/geometri dengan estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel. Enam variabel tersebut terdiri dari: indeks vegetasi RDVI (*renormalized difference vegetation index*), kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah, %C kedalaman 0-15 cm, %C kedalaman 15-50 cm dan %C kedalaman > 50 cm. Hasil uji model dengan RMSE mendapatkan nilai sebesar 2,53079 ton 900m⁻² dan % RMSE sebesar 9,58 %. Model 2 penggabungan estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI dengan estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 3 variabel. Tiga variabel tersebut terdiri dari: indeks vegetasi MSAVI, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah. Hasil uji model dengan RMSE mendapatkan nilai sebesar 6,87089



ton 900m^2 dan % RMSE sebesar 26,0 %. Model 3 penggabungan estimasi karbon biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI dengan estimasi karbon tanah menggunakan 2 variabel. Dua variabel tersebut adalah: indeks vegetasi MSAVI dan kedalaman sedimen. Hasil uji RMSE model tersebut mendapatkan nilai sebesar $6,65033$ ton 900m^2 dan % RMSE sebesar 25,17 %. Model 4 dengan memasukkan nilai rata-rata kedalaman sedimen hasil pengukuran lapang sebesar $100,63$ cm dan rata-rata kerapatan lindak sebesar $1,02$ g cm^{-3} . Persamaan yang paling sesuai untuk model 4 adalah penggabungan estimasi karbon biomassa menggunakan persamaan regresi power/geometri indeks vegetasi VARI dengan regresi berganda 3 variabel. Tiga variabel tersebut adalah indeks vegetasi MSAVI, kedalaman sedimen sebesar $100,63$ cm, kerapatan lindak tanah sebesar $1,02$ g cm^{-3} . Hasil uji RMSE untuk model ini sebesar $9,03122$ ton 900m^2 dan % RMSE sebesar 34,180 %.

5.6. Perbandingan Estimasi Karbon Mangrove Citra Sentinel-2 dengan Citra LDCM (dalam satuan ton ha^{-1})

Perbedaan antara citra Sentinel-2 dan Landsat yang dipergunakan untuk estimasi mangrove pada penelitian ini adalah :

1. Citra Sentinel-2 memiliki band *Blue* ($0,490 \mu\text{m}$), *Green* ($0,560 \mu\text{m}$), *Red* ($0,665 \mu\text{m}$), *Near-infrared 1* ($0,842 \mu\text{m}$), *Near-infrared 2* ($0,865 \mu\text{m}$), *Red Edge 1* ($0,705 \mu\text{m}$) dan *Red Edge 2* ($0,740 \mu\text{m}$) yang dapat dipergunakan untuk analisis indeks vegetasi. Sedangkan pada citra LDCM hanya memiliki saluran *Blue*, *Green*, *Red*, *Near-infrared*, dan tidak memiliki saluran *Red Edge*.
2. Citra Sentinel-2 memiliki resolusi spasial 10 m pada band *Blue*, *Green*, *Red*, *Near-infrared 1* dan 20 meter pada band *Near-infrared 2*, *Red Edge 1* dan *Red Edge 2*. Sedangkan citra Landsat memiliki resolusi spasial 30m .

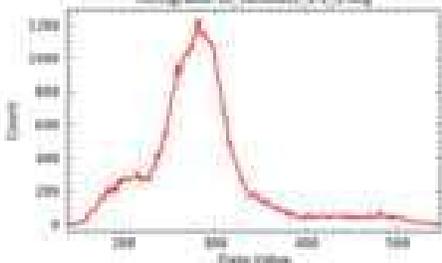


3. Citra Sentinel-2 yang diluncurkan tahun 2015. Sedangkan citra Landsat yang dimanfaatkan dalam penelitian ini Landsat 5 (tahun 1984), Landsat 7 (tahun 1999) dan Landsat 8/LDCM (tahun 2013). Menggunakan citra Landsat dapat melihat perubahan stok karbon mangrove secara temporer dalam jangka waktu yang panjang.

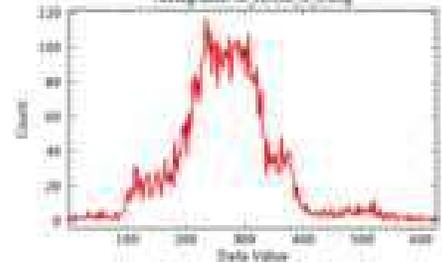
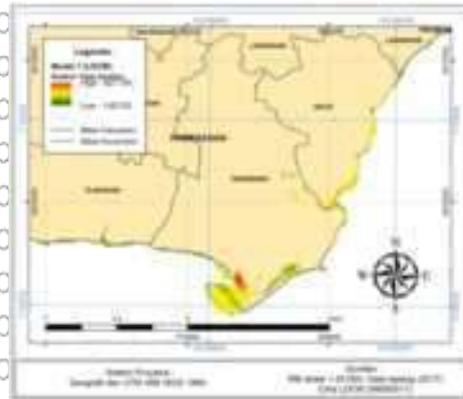
Dalam perbandingan ini satuan piksel yang dipergunakan dirubah dalam hektar, hal ini agar hasil pemodelan antara citra Sentinel-2 dan LDCM setara (dalam satuan yang sama). Hal ini disebabkan luas satu piksel citra Sentinel-2 adalah 10x10 m, sedangkan citra LDCM 30x30 m. Hasil perbandingan model 1 dapat dilihat pada tabel 49 dan Gambar 66, model 2 pada Tabel 50 dan Gambar 67, model 3 pada Tabel 51 dan Gambar 68, model 4 pada Tabel 52 dan Gambar 69.

Perbandingan antara model 1, model 2, model 3 dan model 4 untuk citra Sentinel-2 dan citra LDCM menunjukkan model terbaik adalah model 1, karena hasil uji RMSE mendapatkan nilai terkecil. Secara berurut hasil uji RMSE untuk citra Sentinel-2 adalah 12,85 % (model 1), 16,65 % (model 2), 23,38 % (model 3) dan 29,96 % (model 4). Sedangkan citra LDCM sebagai berikut 9,18 % (model 1), 24,8 % (model 2), 24,05 % (model 3) dan 34,05 % (model 4).

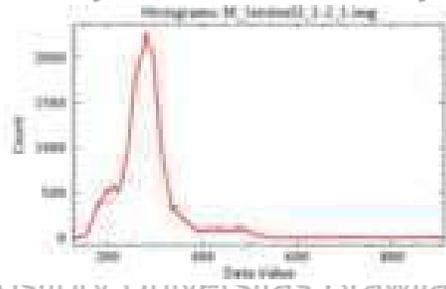
Pemodelan estimasi stok karbon mangrove menggunakan citra sentinel-2, terbaik untuk estimasi stok karbon biomassa vegetasi mangrove menggunakan indeks vegetasi NNIP (terdiri dari saluran merah, hijau dan *Near Infra Red*). Sedangkan untuk estimasi stok karbon tanah menggunakan indeks vegetasi NDRE, WVI, MIRRE (terdiri dari saluran *Near Infra Red* dan *Red Edge*). Pemodelan menggunakan citra LDCM, terbaik untuk estimasi stok biomassa vegetasi mangrove menggunakan indeks vegetasi VARI (merah, hijau dan biru). Sedangkan untuk estimasi tanah menggunakan indeks vegetasi RDVI, MSAVI (terdiri dari saluran merah dan *Near Infra Red*).



Model 1-1 citra Sentinel-2



Model 1 citran LDCM



Model 1-2 citra Sentinel-2

Gambar 66. Perbandingan Peta dan grafik estimasi karbon mangrove hasil model 1 pada citra Sentinel-2 dan LDCM

Perbandingan hasil estimasi karbon citra Sentinel-2 (tanggal 27-7-2017) dan LDCM (9-9-2017), untuk luas mangrove dengan citra Sentinel-2 seluas 660,77 ha dan dengan citra LDCM seluas 630,81 ha. Selisih luas mangrove citra Sentinel-2 dan LDCM seluas 30,0 ha. Hal ini terjadi karena perbedaan resolusi spasial antara citra sentinel-2 (10m) dan citra LDCM (30m). Estimasi stok karbon dengan citra Sentinel-2 sebesar 187.397,99 ton (model 1-1) dan 187.790,34 ton



(model 1-2), sedangkan dengan citra LDCM sebesar 171.799,79 ton. Rata-rata estimasi karbon untuk citra Sentinel-2 sebesar 284 ton ha⁻¹, sedangkan citra LDCM sebesar 272 ton ha⁻¹ (selisih 11 ton ha⁻¹). Hasil uji RMSE untuk citra Sentinel-2 sebesar 39,33 ton ha⁻¹ dengan % RMSE sebesar 12,85 %, sedangkan untuk citra LDCM sebesar 28,11 ton ha⁻¹ dengan % RMSE sebesar 9,18%. Hasil uji RMSE mendapatkan estimasi karbon citra LDCM lebih baik dibandingkan Sentinel-2. Sedangkan jika dilihat dari prosen bias rata-rata karbon estimasi dengan karbon lapang, untuk citra sentinel-2 lebih baik sebesar 4,03% dibandingkan citra LDCM sebesar 5,44%. Perbandingan model 1 antara citra Sentinel-2 dengan LDCM bisa dilihat pada Tabel 49 dan Gambar 66.

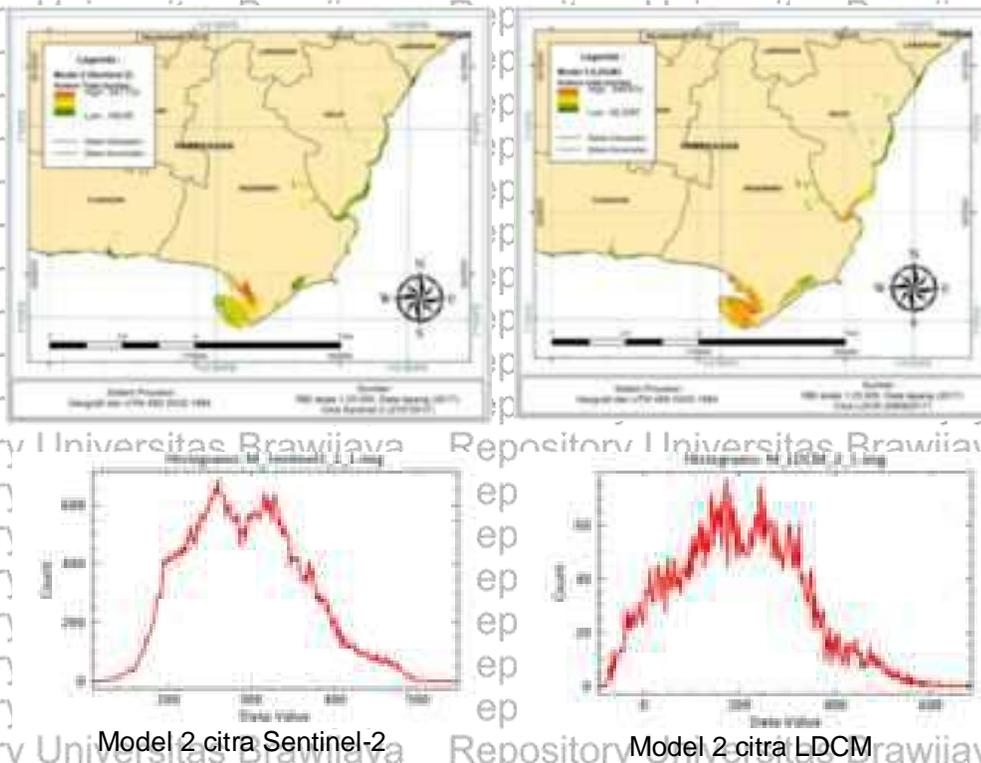
Tabel 49. Perbandingan pemodelan citra Sentinel-2 dan Citra LDCM pada model 1.

No	Parameter	Sentinel-2	Sentinel-2	LDCM
		Model 1-1	Model 1-2	Model 1
1	Luas mangrove hasil citra (ha)	660,77	660,77	630,81
2	Jumlah total karbon estimasi model (ton)	187.397,99	187.790,34	171.799,79
3	rata-rata karbon estimasi model (ton ha ⁻¹)	283,61	284,20	272,35
4	rata-rata karbon pengukuran lapang (ton ha ⁻¹)	306,04	306,04	306,04
5	RMSE (ton ha ⁻¹)	39,33	39,33	28,11
6	%RMSE	12,85	12,85	9,18
7	Bias (ton ha ⁻¹)	12,33	12,33	16,64
8	% bias	4,03	4,03	5,44
9	Min (ton ha ⁻¹)	139,13	128,36	1,62
10	Max (ton ha ⁻¹)	547,16	911,24	627,18
11	Mean (ton ha ⁻¹)	3,82	3,84	3,51
12	Std (ton ha ⁻¹)	33,44	33,82	32,04

Perbandingan hasil estimasi stok karbon model 2 untuk citra Sentinel-2 mendapatkan 194.301,02 ton dan citra LDCM 127.315,47 ton (selisih 66.985 ton). Rata-rata estimasi karbon citra Sentinel-2 sebesar 294,05 ton ha⁻¹ dan untuk citra LDCM sebesar 201,83 ton ha⁻¹ (selisih 92 ton ha⁻¹). Hasil uji RMSE untuk citra Sentinel-2 sebesar 50,95 ton ha⁻¹ dan % RMSE sebesar 16,65%,



sedangkan untuk citra LDCM sebesar 75,91 ton ha⁻¹ dan % RMSE sebesar 24,80%. Hasil uji RMSE untuk estimasi karbon menunjukkan bahwa citra Sentinel-2 lebih baik dari citra LDCM. Jika dilihat dari prosentase bias rata-rata estimasi karbon dengan karbon lapang menunjukkan untuk citra sentinel-2 menunjukkan hasil lebih baik dengan % bias sebesar 5,43%, sedangkan citra LDCM sebesar 5,73%. Perbandingan model 2 antara citra Sentinel-2 dan LDCM dapat dilihat pada Tabel 50 dan Gambar 67.



Gambar 67. Perbandingan Peta dan grafik estimasi karbon mangrove hasil model 2 pada citra Sentinel-2 dan LDCM

Tabel 50. Perbandingan pemodelan citra Sentinel-2 dan Citra LDCM pada model 2.

No	Parameter	Sentinel-2	LDCM
		Model 2	Model 2
1	Luas mangrove hasil citra (ha)	660,77	630,81
2	Jumlah total karbon estimasi model (ton)	194.301,02	127.315,47
3	rata-rata karbon estimasi model (ton ha ⁻¹)	294,05	201,83
4	rata-rata karbon pengukuran lapang (ton ha ⁻¹)	306,04	306,04



201

No	Parameter	Sentinel-2	LDCM
		Model 2	Model 2
5	RMSE (ton ha ⁻¹)	50,95	75,91
6	%RMSE	16,65	24,80
7	Bias (ton ha ⁻¹)	16,62	17,54
8	% bias	5,43	5,73
9	Min (ton ha ⁻¹)	109,65	-93,61
10	Max (ton ha ⁻¹)	547,73	685,91
11	Mean (ton ha ⁻¹)	3,96	2,58
12	Std (ton ha ⁻¹)	34,88	27,06

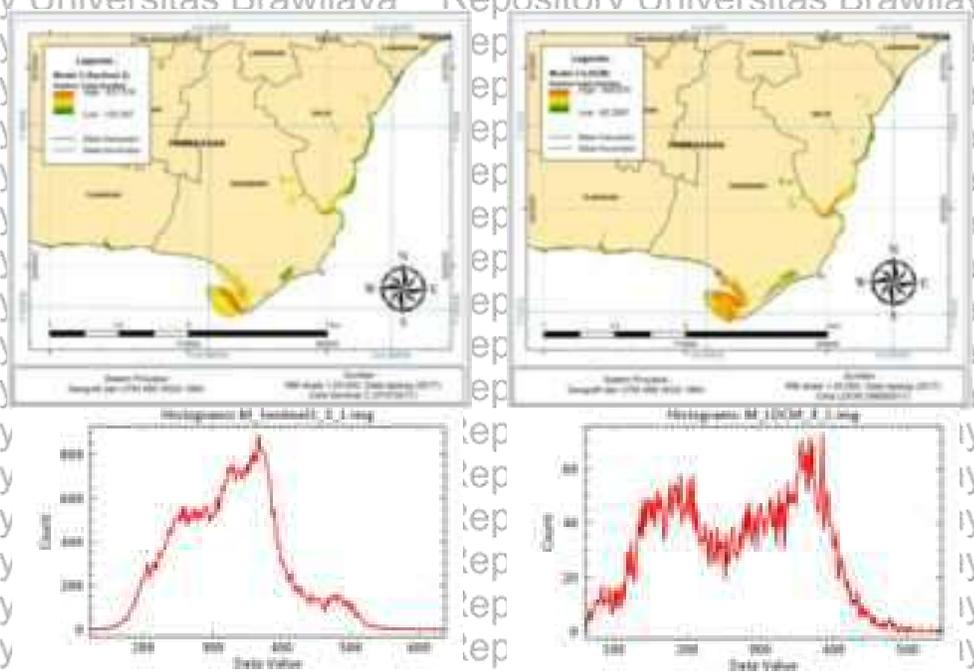
Perbandingan estimasi karbon model 3 untuk citra Sentinel-2 mendapatkan estimasi stok karbon sebesar 216.574,39 ton, sedangkan citra LDCM sebesar 171.993,67 ton. Selisih estimasi stok karbon mangrove sebesar 44.580 ton. Rata-rata estimasi stok karbon untuk citra Sentinel-2 sebesar 327,76 ton ha⁻¹ dan citra LDCM sebesar 272,66 ton ha⁻¹ (selisih 55 ton ha⁻¹). Hasil uji RMSE untuk citra Sentinel-2 sebesar 71,55 ton ha⁻¹ dengan % RMSE sebesar 23,38%. Sedangkan citra LDCM RMSE sebesar 73,61 ton ha⁻¹ dengan % RMSE 24,05%. Nilai ini menunjukkan estimasi karbon citra Sentinel-2 lebih baik dari citra LDCM. Jika dilihat dari prosen bias rata-rata hasil estimasi karbon dengan karbon lapang, untuk citra sentinel-2 sebesar 2,65 % lebih baik dibandingkan citra LDCM sebesar 3,61 %. Perbandingan model 3 estimasi karbon citra Sentinel-2 dan LDCM dapat dilihat pada Tabel 51 dan Gambar 68.

Tabel 51. Perbandingan pemodelan citra Sentinel-2 dan Citra LDCM pada model 3.

No	Parameter	Sentinel-2	LDCM
		Model 3	Model 3
1	Luas mangrove hasil citra (ha)	660,77	630,81
2	Jumlah total karbon estimasi model (ton)	216.574,39	171.993,67
3	rata-rata karbon estimasi model (ton ha ⁻¹)	327,76	272,66
4	rata-rata karbon pengukuran lapang (ton ha ⁻¹)	306,04	306,04
5	RMSE (ton ha ⁻¹)	71,55	73,61
6	%RMSE	23,38	24,05
7	Bias (ton ha ⁻¹)	8,10	11,04



No	Parameter	Sentinel-2	LDCM
		Model 3	Model 3
8	% bias	2,65	3,61
9	Min (ton ha ⁻¹)	123,31	62,23
10	Max (ton ha ⁻¹)	637,52	546,67
11	Mean (ton ha ⁻¹)	4,42	3,51
12	Std (ton ha ⁻¹)	38,79	32,52



Model 3 citra Sentinel-2

Model 3 citra LDCM

Gambar 68. Perbandingan Peta dan grafik estimasi karbon mangrove hasil model 3 pada citra Sentinel-2 dan LDCM

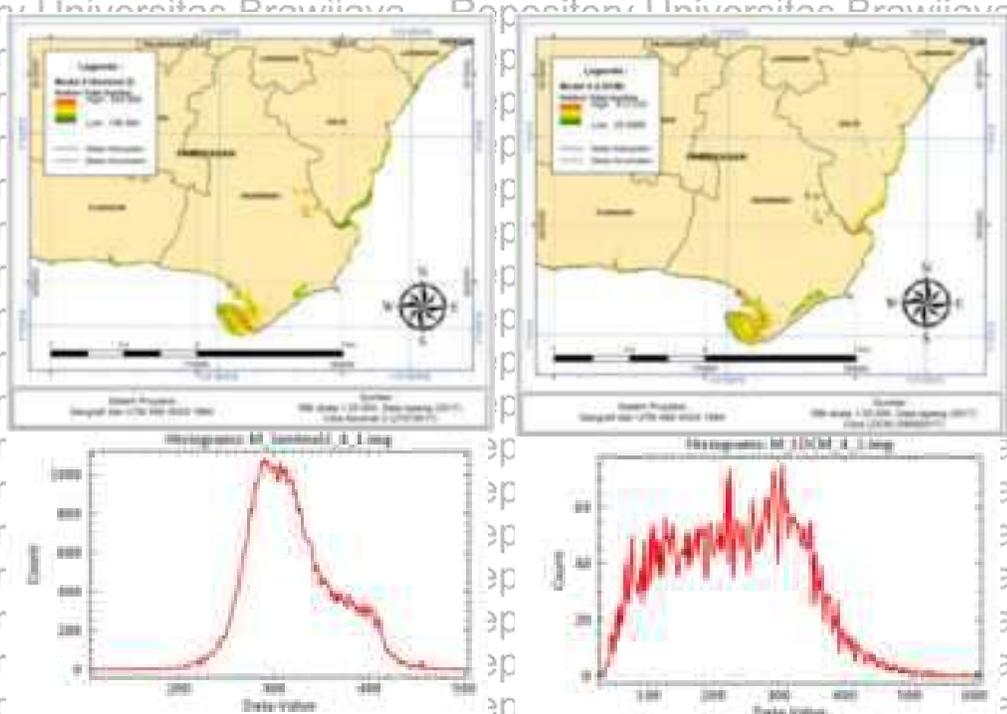
Perbandingan estimasi stok karbon model 4 untuk citra Sentinel-2 mendapatkan karbon sebesar 210.619,7 ton dan citra LDCM sebesar 148.957,6 ha (selisih 61.662,1 ton). Rata-rata estimasi karbon untuk citra Sentinel-2 sebesar 318,75 ton ha⁻¹ dan citra LDCM sebesar 236,14 ton ha⁻¹ (selisih 82,6 ton ha⁻¹). Hasil uji RMSE untuk citra Sentinel-2 sebesar 91,7 ton ha⁻¹ dengan % RMSE sebesar 29,96 %. Sedangkan untuk citra LDCM RMSE sebesar 104,2 ton ha⁻¹ dengan % RMSE sebesar 34,05 %. Hasil ini menunjukkan model 3 dengan citra Sentinel-2 lebih baik dari citra LDCM. Jika dilihat dari prosen bias



rata-rata estimasi karbon dengan karbon lapang, untuk citra sentinel-2 sebesar 2,39% dan citra LDCM sebesar 0,78 %. Perbandingan model 4 untuk citra Sentinel-2 dan LDCM dapat dilihat pada Tabel 52 dan Gambar 69.

Tabel 52. Perbandingan pemodelan citra Sentinel-2 dan Citra LDCM pada model 4.

No	Parameter	Sentinel-2	LDCM
		Model4	Model4
1	Luas mangrove hasil citra (ha)	660,77	630,81
2	Jumlah total karbon estimasi model (ton)	210.619,70	148.957,64
3	rata-rata karbon estimasi model (ton ha ⁻¹)	318,75	236,14
4	rata-rata karbon pengukuran lapang (ton ha ⁻¹)	306,04	306,04
5	RMSE (ton ha ⁻¹)	91,70	104,21
6	%RMSE	29,96	34,05
7	Bias (ton ha ⁻¹)	7,30	2,39
8	% bias	2,39	0,78
9	Min (ton ha ⁻¹)	106,58	25,05
10	Max (ton ha ⁻¹)	504,91	612,23
11	Mean (ton ha ⁻¹)	4,29	3,04
12	Std (ton ha ⁻¹)	37,14	28,87



Model 4 citra Sentinel-2

Model 4 citra LDCM

Gambar 69. Perbandingan Peta dan grafik estimasi karbon mangrove hasil model 4 pada citra Sentinel-2 dan LDCM



Hasil penelitian ini berbeda dengan yang dilakukan oleh Li *et al.* (2007); Vicharnakorn *et al.* (2014); Yu *et al.* (2014); Eckert (2012); Jachowski *et al.* (2013); Hirata *et al.* (2014); Kulawardhana *et al.*, (2014); Wahyuni (2014); Hamdan *et al.* (2014); Frananda *et al.*, (2015); Danosedoro *et al.* (2015); Wicaksono *et al.*, (2016); Hartoko *et al.* (2015); Dabrowska-Zielinska *et al.*, (2016) dimana hanya menggunakan parameter indeks vegetasi atau persamaan statistik pada band citra untuk menduga stok karbon atau biomassa. Sedangkan pada penelitian ini selain indeks vegetasi faktor parameter fisika dan kimia lahan juga diperhitungkan (kedalaman sedimen, kerapatan lindak, % karbon tanah) dengan pendekatan metode *hybrid*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode *hybrid* mendapatkan model lebih baik untuk estimasi stok karbon mangrove.

5.7. Perubahan Stok Karbon Mangrove Tahun 1994, 2002 dan 2017 dengan Menggunakan Citra Landsat

5.7.1. Perubahan Stok Karbon Mangrove di Pesisir Pamekasan dengan Model 1

Tahapan ini adalah penerapan model 1 yang dihasilkan untuk melihat perubahan stok karbon mangrove di pesisir Selatan Pamekasan dari tahun 1994, 2002 dan 2017 dengan menggunakan citra Landsat 5 (1994), Landsat 7 (2002) dan LDCM/Landsat 8 (2017). Persamaan model 1 yang dipergunakan adalah :

$$Y = (66,38 \cdot X_1^{2,104}) + (-97,618 + 2,740589 \cdot X_2 + 0,36241 \cdot X_3 + 40,69228 \cdot X_4 - 7325,77 \cdot X_6 + 9758,635 \cdot X_6 - 526,508 \cdot X_7)$$

Keterangan :

X1 = Indeks vegetasi VARI

X2 = Indeks vegetasi RDVI

$$VARI = \frac{(G-R)}{(G+R-B)}$$

$$RDVI = \frac{[(NIR - R) / (NIR + R)^2]}$$

G = band 3 Citra LDCM

R = band 4 Citra LDCM

B = band 2 Citra LDCM



NIR = band 5 Citra LDCM

X3 = Kedalaman sedimen (cm),

X4 = Kerapatan lindak (g cm^{-3}),

X5 = % C kedalaman 0-15cm,

X6 = % C kedalaman 15-50 cm,

X7 = % C kedalaman >15cm

Model 1 bisa dipergunakan jika pada lokasi estimasi sudah didapatkan data kedalaman sedimen, kerapatan lindak dan % C (pada kedalaman 0-15 cm, 15-50 cm, dan > 50 cm). Hasil aplikasi model untuk citra Landsat tahun 1994,

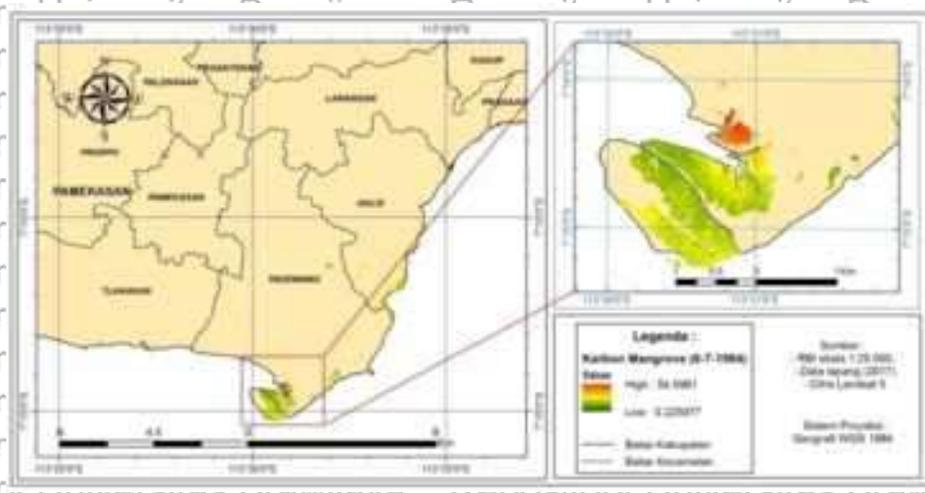
2002, dan 2017 dapat dilihat pada Tabel 53 dan Gambar 70. Hasil estimasi mangrove berdasarkan luas mangrove tahun 1994 seluas 276,93 ha dan tahun 2002 seluas 420,57 ha. Dari tahun 1994-2002 selama 8 tahun terjadi penambahan mangrove seluas 143,6 ha atau bertambah sebesar 51,9%. Luas mangrove tahun 2017 seluas 560,79 ha. Dari tahun 2012-2017 selama 15 tahun terjadi penambahan mangrove seluas 140,2 ha atau bertambah sebesar 33,3 %.

Rata rata pertambahan pertahun dari tahun 1994-2002 sebesar $17,95 \text{ ha tahun}^{-1}$; sedangkan dari tahun 2002-2017 bertambah sebesar $9,35 \text{ ha tahun}^{-1}$.

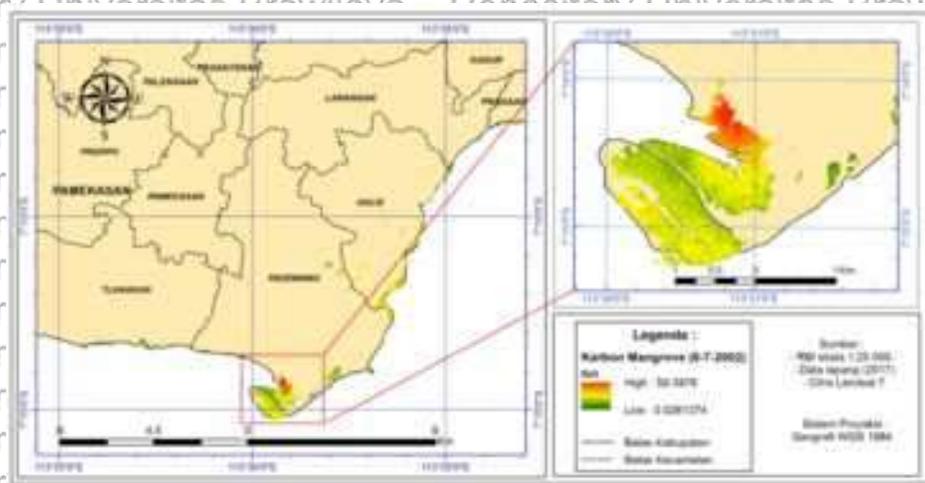
Hasil penerapan model 1 mendapatkan terjadi penambahan stok karbon mangrove dari tahun 1994 sebesar 76.262,4 ton dan tahun 2002 sebesar 116.044,9 ton. Selama 8 tahun terjadi penambahan stok sebesar 39.782,5 ton atau bertambah sebesar 52,2%. Sedangkan dari tahun 2002 sebesar 116.044,9 ton, tahun 2017 sebesar 153.897,8 ton. Selama 15 tahun terjadi penambahan stok sebesar 37.852,9 ton atau bertambah sebesar 32,6%. Rata-rata pertambahan stok karbon mangrove pertahun dari tahun 1994 - 2002 sebesar $4.972,8 \text{ ton tahun}^{-1}$. Sedangkan dari tahun 2002 -2017 bertambah pertahun sebesar $2.523,5 \text{ ton tahun}^{-1}$. Peta stok karbon mangrove tahun 1994, 2002 dan 2017 dapat dilihat pada Gambar 70.

Tabel 53. Stok karbon mangrove tahun 1994, 2002, 2017 hasil estimasi citra Landsat 5, 7 dan LDCM di Pesisir Selatan Pamekasan

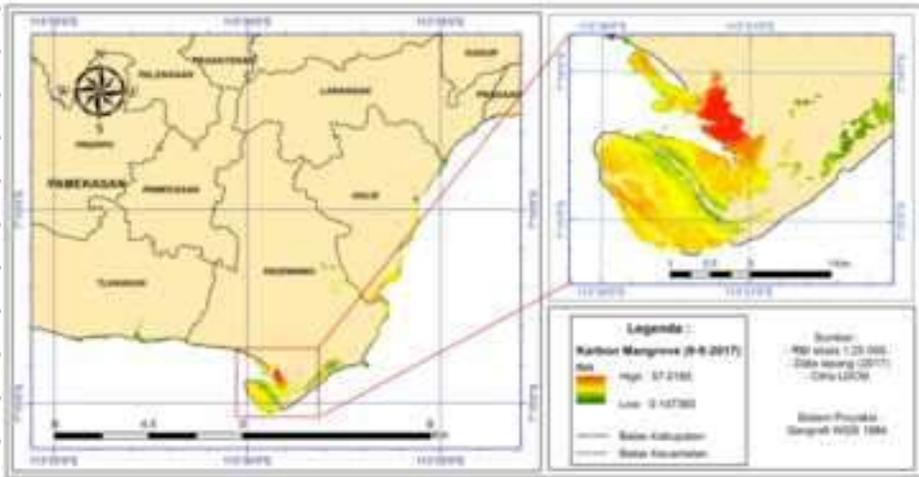
No	Kecamatan	Luas (ha)			Stok Karbon mangrove (ton)		
		1994	2002	2017	1994	2002	2017
1	Tlanakan	5,94	18,63	34,11	1.119,6	2.976,1	4.801,9
2	Pademawu	197,55	280,08	387,99	53.002,9	78.227,9	108.257,3
3	Larangan	0,72	5,04	6,84	44,7	688,2	993,5
4	Galis	72,72	116,82	131,85	22.095,2	34.152,6	39.845,2
Total		276,93	420,57	560,79	76.262,4	116.044,9	153.897,8



(a)



(b)



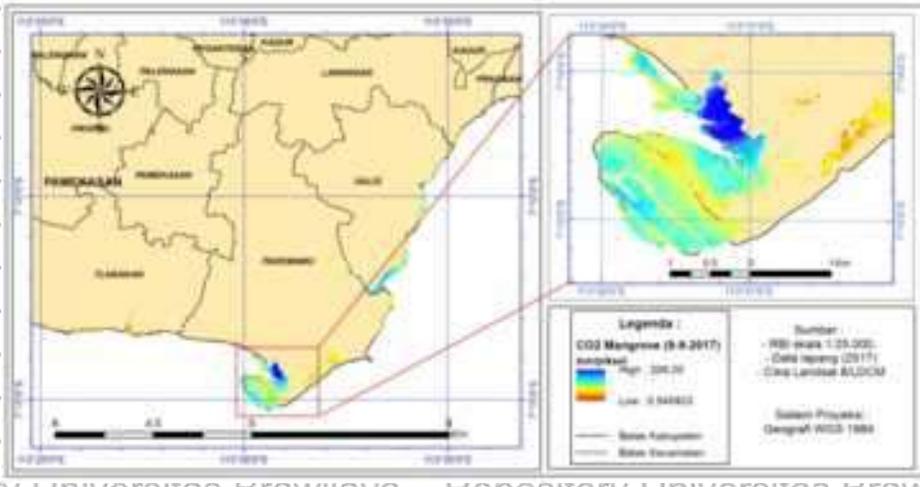
Gambar 70. Peta Stok Karbon Mangrove (a) tahun 1994 dari citra Landsat 5, (b) tahun 2002 dari citra Lansat 7 dan (c) 2017 dari citra Landsat 8 (LDCM).

5.7.2. Perubahan kandungan CO₂e dalam mangrove di Pesisir Pamekasan

"Karbon dioksida yang setara" atau "CO₂e" adalah istilah untuk menggambarkan gas rumah kaca yang berbeda dalam unit yang sama. CO₂e menandakan jumlah CO₂ yang setara akan memiliki dampak pemanasan global.

"Karbon" kadang-kadang digunakan sebagai singkatan untuk mengacu pada CO₂ atau gas rumah kaca pada umumnya. Karbon juga dapat digunakan untuk mengekspresikan emisi CO₂ dalam jumlah karbon dalam CO₂. Berat atom karbon adalah 12 dan berat atom oksigen adalah 16, sehingga total berat atom CO₂ adalah 44. Hal ini bahwa kuantitas CO₂ dapat dinyatakan dalam jumlah karbon yang dikandungnya dengan mengalikan jumlah CO₂ dengan 0,27 atau 12/44 (Brander, 2012). Total stok karbon dapat dikonversi menjadi CO₂e dengan mengalikan densitas karbon atau persediaan sebesar 3,67 atau 44/12 (Kauffman & Donato, 2012).

Hasil perhitungan estimasi kandungan CO₂e didapatkan dari konversi stok karbon mangrove. Hasil estimasi CO₂e mangrove tahun 1994 didapatkan nilai sebesar 279.879,5 ton dan tahun 2002 sebesar 425.518,2 ton. Penambahan CO₂e tahun 1994-2002 selama 8 tahun terjadi penambahan sebesar 145.638,7 ton atau bertambah 52,0%. Besar CO₂e tahun 2017 sebesar 564.293,2 ton.



Gambar 71. Peta CO2 Mangrove (a) tahun 1994 dari citra Landsat 5, (b) tahun 2002 dari citra Lansat 7 dan (c) 2017 dari citra Landsat 8 (LDCM).

Tabel 54. Total CO2e mangrove tahun 1994, 2002, 2017 hasil estimasi citra Landsat 5, 7 dan LDCM di Pesisir Selatan Pamekasan

Tahun	Min	Max	Mean	StdDev	pixel	Total CO2e (ton)
1994	0,83	200,37	91,21	22,67	3.077	279.879,5
2002	0,1	217,99	91,41	26,61	4.673	425.518,2
2017	0,54	209,25	90,97	28,71	6.231	564.293,2

5.8. Perubahan Stok Karbon Mangrove di Pulau Madura Tahun 1994, 2002 dan 2017 Menggunakan Citra Landsat

Tahapan ini adalah penerapan model 4 untuk melihat perubahan stok karbon mangrove di Pulau Madura dari tahun 1994, 2002 dan 2017. Citra satelit yang dipergunakan adalah citra Landsat 5 (1994), Landsat 7 (2002) dan LDCM/Landsat 8 (2017). Pada estimasi stok karbon di Pulau Madura menggunakan model 4, karena tidak ada data kedalaman sedimen, kerapatan lindak dan % C (pada kedalaman 0-15 cm, 15-50 cm dan > 50 cm). Persamaan model 4 yang dipergunakan adalah :

$$Y = (66,38 * X1^{2,104}) + (-13,91 + 20,54032 * X2 + 0,26787 * X3)$$

Keterangan :

- X1 = Indeks vegetasi VARI
- X2 = Indeks vegetasi MSAVI
- VARI = $\frac{(G-R)}{(G+R-B)}$



$$\text{MSAVI} = \frac{1}{2} [2 * \text{NIR} + 1 + \sqrt{(2 * \text{NIR} + 1)^2 - 8 * (\text{NIR} + R)}]$$

G = band 3 Citra LDCM

R = band 4 Citra LDCM

B = band 2 Citra LDCM

NIR = band 5 Citra LDCM

X3 = rata-rata kedalaman sedimen (100,63cm),

Hasil analisis citra satelit mendapatkan terjadi perubahan penambahan

luas mangrove dan stok karbon di Pulau Madura tahun 1994 - 2002 - 2017. Luas mangrove dari tahun 1994 sebesar 1.905,8 ha (Tabel 55). Luas mangrove tahun 2002 sebesar 2.008,0 ha (Tabel 56). Penambahan luas mangrove dari tahun 1994-2002 selama 8 tahun seluas 102,2 ha atau bertambah 5,4%. Penambahan luas terjadi di Kabupaten Sampang seluas 141,6 ha, Kabupaten Pamekasan seluas 143,6 ha, dan Kabupaten Sumenep seluas 89,3 ha. Sedangkan di Kabupaten Bangkalan berkurang seluas 272,3 ha.

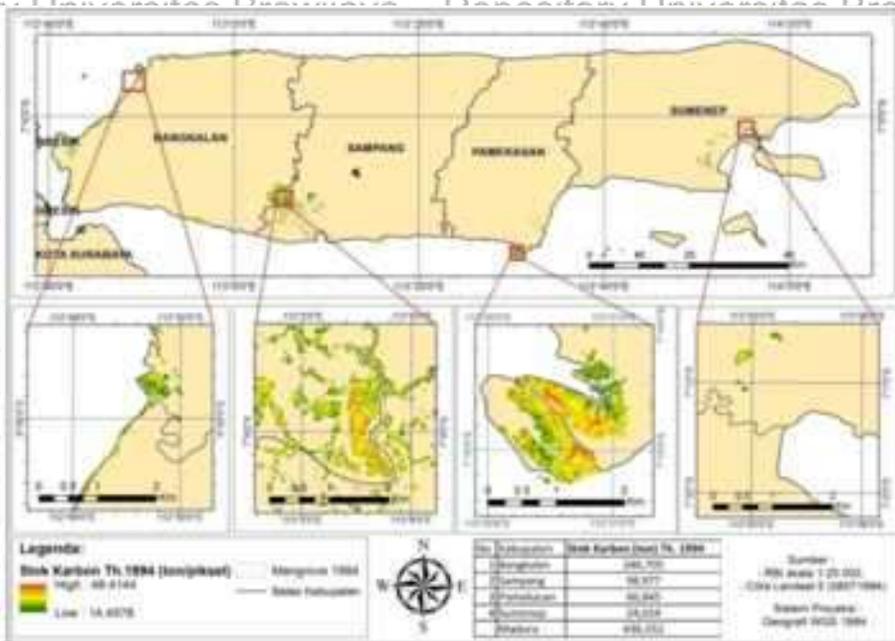
Luas mangrove tahun 2017 seluas 3.675,9 ha (Tabel 57). Penambahan luas mangrove tahun 2002-2017 selama 15 tahun sebesar 1.667,9 ha atau bertambah 83,1 %. Penambahan luas terjadi di Kabupaten Bangkalan 917,9 ha, Kabupaten Sampang 338,8 ha, Kabupaten Pamekasan 140,2 ha dan Kabupaten Sumenep bertambah 271,0 ha. Rata rata pertambahan luas mangrove pertahun dari tahun 1994-2002 sebesar 12,8 ha tahun⁻¹, sedangkan dari tahun 2002 -2017 sebesar 111,2 ha tahun⁻¹.

Stok karbon mangrove dianalisis dengan model 4. Stok karbon mangrove di Pulau Madura dari tahun 1994 sebesar 436.552 ton (Gambar 72 dan Tabel 55). Stok karbon mangrove tahun 2002 sebesar 458.985 ton (Gambar 73 dan Tabel 56). Stok karbon mangrove dari tahun 1994-2002 selama 8 tahun terjadi penambahan sebesar 22.433,6 ton atau bertambah sebesar 5,1%. Penambahan stok karbon terjadi di Kabupaten Sampang sebesar 32.942,7 ton, Kabupaten



Pamekasan sebesar 36.415,7 ton, Kabupaten Sumenep sebesar 20.636,5 ton, sedangkan di Kabupaten Bangkalan berkurang sebesar 67.561,4 ton.

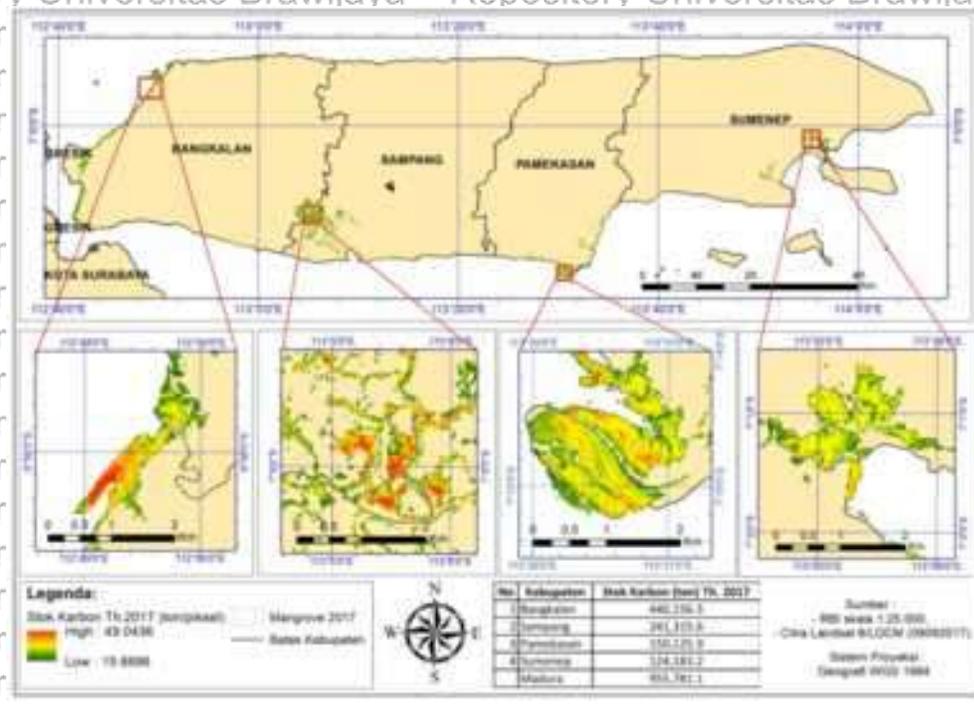
Stok karbon dari tahun 2017 sebesar 955.781 ton (Gambar 74 dan Tabel 58). Stok karbon mangrove mengalami penambahan selama 15 tahun sebesar 496.795,8 ton atau bertambah 108,2 %. Penambahan stok karbon terjadi di Kabupaten Bangkalan sebesar 261.012,6 ton, Kabupaten Sampang sebesar 109.395,7 ton, Kabupaten Pamekasan sebesar 46.038,0 ton dan Kabupaten Sumenep sebesar 79.522,4 ton. Rata rata pertambahan stok karbon mangrove pertahun dari tahun 1994-2002 sebesar 2.804,2 ton tahun⁻¹. Sedangkan dari tahun 2002-2017 sebesar 33.119,7 ton tahun⁻¹. Kauffman and Donato (2012) mendapatkan rata-rata stok karbon mangrove di Kalimantan sebesar 1.259,0 ton ha⁻¹, nilai ini jauh lebih besar dari hasil penelitian ini. Hal ini menunjukkan mangrove di Kalimantan jauh lebih lebat dari Pulau Madura. Hasil ini lebih kecil dari yang dihasilkan penelitian ini.



Gambar 72. Peta Stok Karbon Mangrove tahun 1994 dari citra Landsat 5 tanggal 8 Juli 1994 di Pulau Madura



Gambar 73. Peta Stok Karbon Mangrove tahun 2002 dari citra Landsat 7 tanggal 23 Agustus 2002 di Pulau Madura



Gambar 74. Peta Stok Karbon Mangrove tahun 2017 dari citra Landsat 8/ LDCM tanggal 9 September 2017 di Pulau Madura

Tabel 55. Stok karbon mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 1994 dari citra Landsat 5 tanggal 8 Juli 1994.

No	Kabupaten	Min	Max	Mean	StdDev	Pixel	Luas (ha)	Stok Karbon (ton)
1	Bangkalan	15,59	33,43	20,58	2,61	12.005	1.080,5	246.705
2	Sampang	15,19	36,36	20,3	2,68	4.885	439,7	98.977
3	Pamekasan	15,71	48,41	21,75	3,24	3.077	276,9	66.845
4	Sumenep	14,46	32,3	19,91	2,82	1.209	108,8	24.024
	P, Madura	14,46	48,41	20,65	2,78	21.176	1.905,8	436.552

Tabel 56. Stok karbon mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 2002 dari citra Landsat 7 tanggal 23 Agustus 2002.

No	Kabupaten	Min	Max	Mean	StdDev	Pixel	Luas (ha)	Stok Karbon (ton)
1	Bangkalan	15,4	36,87	19,99	2,75	8.979	808,1	179.144
2	Sampang	15,08	46,11	20,49	3,09	6.458	581,2	131.920
3	Pamekasan	16,23	48,79	22,14	3,56	4.673	420,6	103.261
4	Sumenep	15,87	43,75	20,35	3,64	2.201	198,1	44.661
	P, Madura	15,08	48,79	20,62	3,23	22.311	2.008,0	458.985

Tabel 57. Stok karbon mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 2017 dari citra Landsat 8/LDCM tanggal 9 September 2017.

No	Kabupaten	Min	Max	Mean	StdDev	Pixel	Luas (ha)	Stok Karbon (ton)
1	Bangkalan	16,0	49,0	23,0	4,5	19.178,0	1.726,0	440.156,5
2	Sampang	15,9	42,5	23,7	4,6	10.222,0	920,0	241.315,6
3	Pamekasan	16,6	44,2	24,0	4,2	6.231,0	560,8	149.298,8
4	Sumenep	15,7	48,1	23,9	4,8	5.212,0	469,1	124.183,2
	P, Madura	15,7	49,0	23,4	4,5	40.843,0	3.675,9	955.781,1



5.8.1. Perubahan Kandungan CO₂e dalam mangrove di Pulau Madura

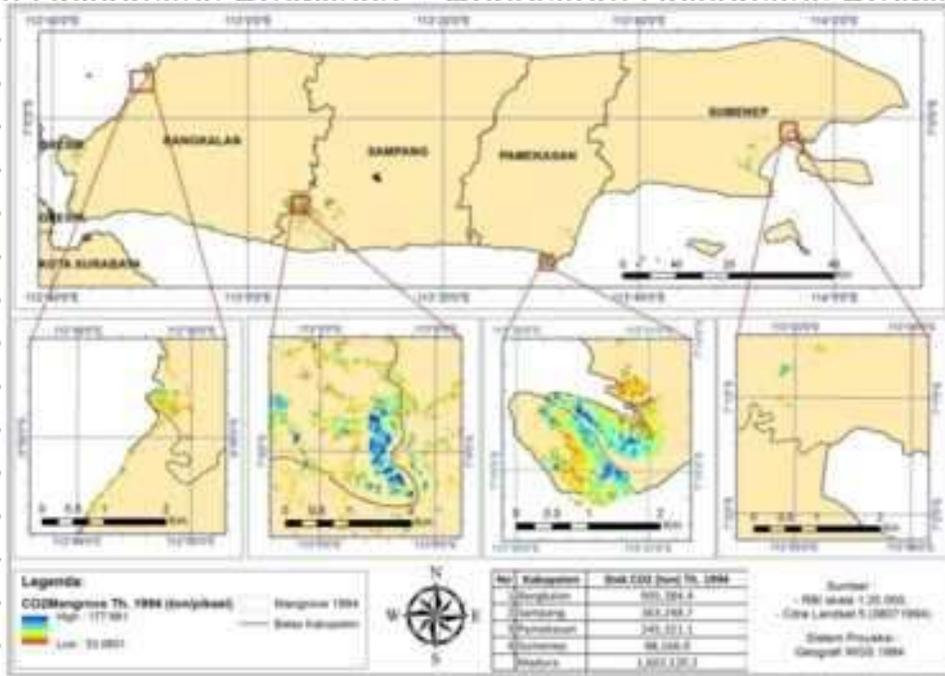
Pada tahap ini dilakukan konversi stok karbon mangrove hasil analisis model 4 ke kandungan CO₂e. Kandungan CO₂e mangrove di Pulau Madura tahun 1994 sebesar 1.602.120,2 ton (lihat Tabel 59 dan Gambar 75). Kandungan CO₂e tahun 2002 sebesar 1.684.476,2 ton (lihat Tabel 60 dan Gambar 76). Terjadi penambahan kandungan CO₂e dari tahun 1994-2002 selama 8 tahun sebesar 82.356,0 ton atau bertambah sebesar 5,1%. Penambahan CO₂e terjadi di Kabupaten Sampang sebesar 120.894,1 ton, Kabupaten Pamekasan sebesar 133.647,9 ton, Kabupaten Sumenep sebesar 75.739,7 ton, sedangkan di Kabupaten Bangkalan berkurang sebesar 247.925,7 ton.

Kandungan CO₂e tahun 2017 sebesar 3.504.676,2 ton (lihat Tabel 61 dan Gambar 77). Terjadi penambahan kandungan CO₂e dari tahun 2002-2017 selama 15 tahun sebesar 1.820.200,0 ton atau bertambah sebesar 108,1%. Penambahan kandungan CO₂e terjadi di Kabupaten Bangkalan sebesar 957.920,9 ton, Kabupaten Sampang sebesar 401.479,3 ton, Kabupaten Pamekasan sebesar 168.953,2 ton dan Kabupaten Sumenep sebesar 291.846,7 ton. Rata-rata pertambahan kandungan CO₂e mangrove pertahun di Pulau Madura dari tahun 1994-2002 sebesar 10.294,5 ton tahun⁻¹. Tahun 2002-2017 sebesar 121.346,7 ton tahun⁻¹. Dapat disimpulkan mangrove di Pulau Madura selama periode tahun 1994-2002 dapat menekan emisi CO₂ sebesar 82.356,0 ton atau 10.294,5 ton tahun⁻¹ dan pada periode 2002-2017 dapat menekan emisi CO₂ sebesar 1.820.200,0 ton atau 121.346,7 ton tahun⁻¹.

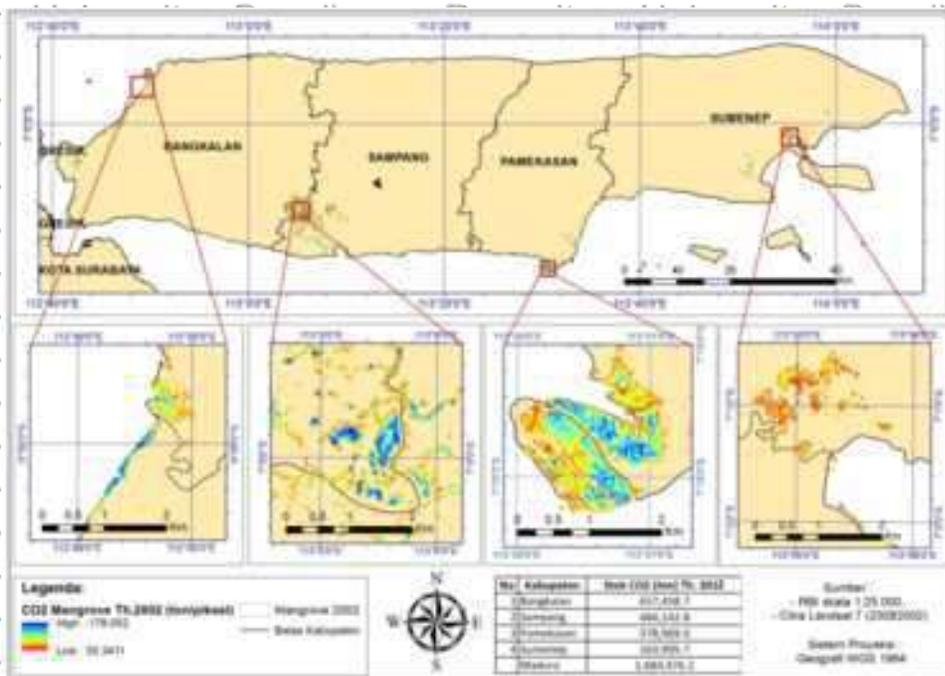
Peta kandungan CO₂e tahun 1994 dapat dilihat pada Gambar 85, tahun 2002 pada Gambar 86 dan tahun 2017 pada Gambar 87. Hasil penelitian Kauffman and Donato (2012) mendapatkan rata-rata CO₂e mangrove di



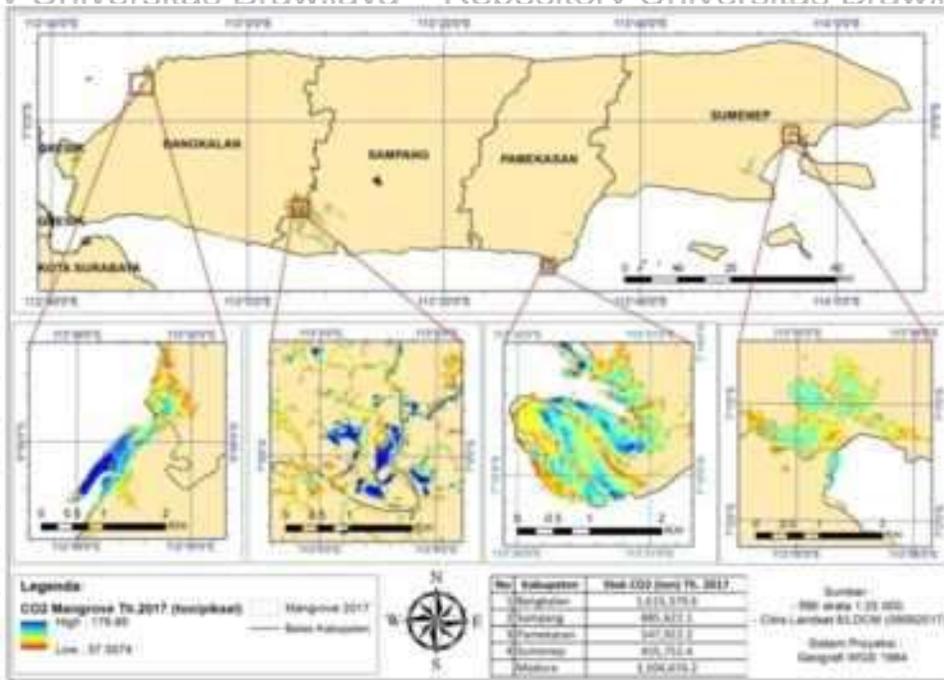
Kalimantan sebesar 4.621 ton ha⁻¹. Hasil ini jauh lebih kecil dari yang dihasilkan pada penelitian ini.



Gambar 75. Peta kandungan CO₂ dalam mangrove tahun 1994 dari citra Landsat 5 tanggal 5 Juli 1994 di Pulau Madura



Gambar 76. Peta kandungan CO₂ dalam mangrove tahun 2002 dari citra Landsat 7 tanggal 23 agustus 2002 di Pulau Madura



Gambar 77. Peta kandungan CO2 dalam mangrove tahun 2017 dari citra Landsat 8/ LDCM tanggal 9 September 2017 di Pulau Madura

Hasil dari pemetaan perubahan karbon mangrove dan konversinya ke CO₂ dapat dijadikan dasar untuk membuat rekomendasi kebijakan dalam pengelolaan hutan mangrove di wilayah Madura. Data tersebut dapat dijadikan landasan untuk melakukan pengembangan potensi hutan mangrove (antara lain : penanaman hutan mangrove atau lokasi ekowisata). Selain itu informasi ini dapat dipergunakan sebagai dasar dalam pengembangan lahan tambak sehingga mampu meminimalisir kerusakan hutan mangrove, dan fungsi ekologis mangrove sebagai penyerap emisi dan penyimpan cadangan karbon tidak terganggu.

Luas Mangrove di Indonesia mencapai 3,2 juta ha, dengan jumlah stok CO₂ mencapai 167 Mton CO₂ th⁻¹ dan rata-rata 320,1 ton CO₂ ha⁻¹ (Wahyudi *et al.*, 2018). Jika dibandingkan dengan Pulau Madura luas mangrove dengan Madura kepulauan sebesar 15.118 ha (0,47 % dari luas mangrove di Indonesia. Jumlah stok CO₂ mencapai 121.347 ton CO₂ th⁻¹ atau mencapai 0,07% dari stok



CO₂ di Indonesia. Rata-rata CO₂ di Madura sebesar 306 ton CO₂ ha⁻¹ nilai ini hampir sama dengan rata-rata CO₂ nasional.

Pertambahan stok CO₂ pertahun dilakukan konversi untuk melihat seberapa besar kemampuan mangrove di Madura untuk menyimpan stok karbon dalam setahun bila disetarakan dengan konsumsi Bahan Bakar Minyak. Konversi mengikuti Pedoman Teknis Perhitungan Baseline Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Berbasis Energi. Konversi untuk BBM jenis solar 1 liter setara dengan 2,2 kg CO₂/liter BBM, sedangkan jenis premium 1 liter setara dengan 2,6 kg CO₂/liter BBM (Zacky *et al.*, 2014). Mengikuti konversi tersebut mangrove di Madura tahun 1994-2002 dalam setahun mampu menyimpan CO₂ setara BBM jenis premium sebanyak 3.959.424 liter atau BBM jenis solar sebanyak 1.799.738 liter. Sedangkan tahun 2002-2017 dalam setahun mampu menyimpan CO₂ setara BBM jenis premium sebanyak 46.671.795 liter atau BBM jenis solar sebanyak 21.214.452 liter.

Tabel 58. Konversi CO₂ ke Bahan Bakar Bensin dan Solar

Tahun	Pertambahan Stok CO ₂ (ton th ⁻¹)	Konversi ke Premium (liter)	Konversi ke Solar (liter)
1994-2002	10.294.501	3.959.424	1.799.738
2002-2017	121.346.667	46.671.795	21.214.452

sumber : Pedoman Teknis Perhitungan Baseline Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Berbasis Energi (2014)

Tabel 59. Kandungan CO₂ dalam mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 1994 dari citra Landsat 5 tanggal 5 Juli 1994.

No	Kabupaten	Min	Max	Mean	StdDev	Pixel	Luas (ha)	Stok CO ₂ (ton)
1	Bangkalan	57,23	122,67	75,55	9,58	12.005	1.080,5	905.384
2	Sampang	55,73	133,45	74,51	9,82	4.885	439,7	363.249
3	Pamekasan	57,65	177,68	79,83	11,91	3.082	277,4	245.321
4	Sumenep	53,06	118,54	73,05	10,36	1.209	108,8	88.166
	P. Madura	53,06	177,68	75,79	10,21	21.181	1.906,3	1.602.120

Tabel 60. Kandungan CO₂ dalam mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 2002 dari citra Landsat 7 tanggal 23 agustus 2002.

No	Kabupaten	Min	Max	Mean	StdDev	Pixel	Luas (ha)	Stok CO ₂ (ton)
1	Bangkalan	56,5	135,3	73,38	10,08	8979	808,1	657.458,70
2	Sampang	55,34	169,23	75,19	11,33	6458	581,2	484.142,80
3	Pamekasan	59,58	179,05	81,26	13,05	4677	420,9	378.969,02
4	Sumenep	58,25	160,58	74,67	13,37	2201	198,1	163.905,71
	P. Madura	55,34	179,05	75,68	11,84	22315	2.008,4	1.684.476,23

Tabel 61. Kandungan CO₂ dalam mangrove pada masing-masing kabupaten di Pulau Madura tahun 1994 dari citra Landsat 8/LDCM tanggal 9 September 2017.

No	Kabupaten	Min	Max	Mean	StdDev	Pixel	Luas (ha)	Stok CO ₂ (ton)
1	Bangkalan	58,71	179,99	84,47	16,55	19.178,0	1.726,0	1.615.379,6
2	Sampang	58,41	156	86,83	16,77	10.222,0	920,0	885.622,1
3	Pamekasan	60,76	162,13	88,14	15,48	6.231,0	560,8	547.922,2
4	Sumenep	57,51	176,62	87,68	17,47	5.212,0	469,1	455.752,4
	P. Madura	57,51	179,99	86,39	16,74	40.843,0	3.675,9	3.504.676,2



5.9. Kebaruan (Novelty) Penelitian

Pada penelitian ini ada beberapa keterbaruan yang didapatkan, yaitu :

1. Perbedaan stok karbon mangrove muara dan mangrove laut.

Perbandingan biomassa mangrove muara dengan mangrove laut adalah

1:1,8. Perbandingan stok karbon tanah antara mangrove muara dan laut

lebih besar mangrove muara sebesar 1,8:1. Perbandingan stok karbon

mangrove campuran untuk karbon biomassa (pohon, akar dan tanaman

bawah) dengan karbon tanah mencapai 1:4,8. Perbandingan stok karbon

mangrove muara untuk stok karbon biomassa dengan karbon tanah

sebesar 1:9,1, sedangkan mangrove laut mencapai 1:2,8.

2. Model estimasi stok karbon mangrove (ton piksel¹), yang terdiri dari

karbon biomassa vegetasi (karbon pohon, karbon akar dan karbon

tanaman bawah) dan karbon tanah menggunakan citra satelit Sentinel-2

dan LDCM yang dijadikan dalam satu persamaan. Model tersebut

menggunakan pendekatan indeks vegetasi dan metode *hybrid*

(menggunakan data citra satelit dan data kedalaman sedimen, kerapatan

lindak dan prosentasi kandungan karbon pada kedalaman

tanah/sedimen) . Penggunaan model yang paling sesuai didasarkan dari

ketersediaan data yang dimiliki pengguna. Model ini sangat bermanfaat

untuk menentukan seberapa besar manfaat ekologi mangrove untuk

pengembangan wilayah pesisir. Penentuan lokasi untuk pengembangan

wilayah pesisir harus memperhitungkan stok karbon mangrove, sehingga

secara ekologis fungsi mangrove sebagai penyimpan karbon tidak

terganggu.

Model dengan menggunakan citra satelit Sentinel 2, yaitu:

Model 1 dengan penggabungan antara estimasi karbon biomassa

menggunakan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri



dengan estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel (indeks vegetasi NDRE atau WVVI, kedalaman sedimen (cm), kerapatan lindak tanah (g cm^{-3}), % C kedalaman 0-15 cm, % C kedalaman 15-50 cm dan %C kedalaman >50 cm). Hasil uji % RMSE sebesar 16,12%.

$$\text{Karbon Mangrove} = (280,445188 * ((\frac{\text{band8}}{(\text{band8} + \text{band4} + \text{band3})})^{13,638683})) + (-3,42587 - 3,44731 * (\frac{\text{band8} - \text{band5}}{\text{band8} + \text{band5}}) + 0,017952 * (\text{kedalaman sedimen}) + 2,817974 * (\text{Kerapatan lindak}) + 25,45099 * (\% \text{C kedalaman 0-15cm}) + 17,43371 * (\% \text{C kedalaman 15-50 cm}) + 50,02014 * (\% \text{C kedalaman } > 50 \text{cm}))$$

atau

$$\text{Karbon Mangrove} = (280,445188 * ((\frac{\text{band8}}{(\text{band8} + \text{band4} + \text{band3})})^{13,638683})) + (-3,42587 - 3,44731 * (\frac{\text{band8A} - \text{band5}}{\text{band8A} + \text{band5}}) + 0,017952 * (\text{kedalaman sedimen}) + 2,817974 * (\text{kerapatan lindak}) + 25,45099 * (\% \text{C kedalaman 0-15cm}) + 17,43371 * (\% \text{C kedalaman 15-50 cm}) + 50,02014 * (\% \text{C kedalaman } > 50 \text{cm}))$$

Model 2 penggabungan estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri dengan estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 3 variabel (indeks vegetasi VIRRE, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah). Hasil uji % RMSE 19,03%.

$$\text{Karbon Mangrove} = (280,445188 * ((\frac{\text{band8}}{(\text{band8} + \text{band4} + \text{band3})})^{13,638683})) + (3,083467 - 1,7259 * (\frac{\text{band8}}{\text{band5}}) + 0,016404 * (\text{kedalaman sedimen}) + 1,528649 * (\text{kerapatan lindak}))$$

Model 3 penggabungan estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri dengan estimasi tanah menggunakan 2 variabel (indeks vegetasi yang sesuai NDRE dan kedalaman sedimen). Hasil uji % RMSE 24,63%.

$$\text{Karbon Mangrove} = (280,445188 * ((\frac{\text{band8}}{(\text{band8} + \text{band4} + \text{band3})})^{13,638683})) + (3,346314 - 7,78604 * (\frac{\text{band8} - \text{band5}}{\text{band8} + \text{band5}}) + 0,020421 * (\text{kedalaman sedimen}))$$



Model 4 penggabungan estimasi karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri dengan regresi berganda 3 variabel (indeks vegetasi VIRRE, nilai rata-rata kedalaman sedimen 100,63 cm, nilai rata-rata kerapatan lindak tanah $1,02 \text{ g cm}^{-3}$) untuk estimasi karbon tanah. Hasil uji % RMSE sebesar 33,89%.

$$\text{Karbon Mangrove} = (280,445188 * ((\frac{\text{band8}}{\text{band8} + \text{band4} + \text{band3}})^{13,638683})) + (3,083467 - 1,7259 * (\frac{\text{band8}}{\text{band5}}) + 0,016404 * (\text{rata-rata kedalaman sedimen}) + 1,528649 * (\text{rata-rata kerapatan lindak}))$$

Model dengan menggunakan citra satelit LDCM, yaitu:

Model 1 penggabungan estimasi karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi VARI (*vegetation atmospherically resistant index*) regresi power/geometri dengan estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel (indeks vegetasi RDVI (*renormalized difference vegetation index*), kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah, %C kedalaman 0-15 cm, %C kedalaman 15-50 cm dan %C kedalaman >50 cm). Hasil uji % RMSE sebesar 9,58%.

$$\text{Karbon Mangrove} = (66,38 * ((\frac{\text{band3} - \text{band4}}{\text{band3} + \text{band4} - \text{band2}})^{2,104})) + (-97,618 + 2,740589 * ((\frac{\text{band5} - \text{band4}}{\text{band5} + R})^2)) + 0,36241 * (\text{kedalaman sedimen}) + 40,69228 * (\text{kerapatan lindak}) - 7325,77 * (\%C \text{ kedalaman } 0-15\text{cm}) + 9758,635 * (\%C \text{ kedalaman } 15-50 \text{ cm}) - 526,508 * (\%C \text{ kedalaman } >50\text{cm}))$$

Model 2 estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dengan estimasi karbon tanah menggunakan regresi berganda 3 variabel (indeks vegetasi MSAVI, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah). Hasil uji % RMSE 26,0 %.

$$\text{Karbon Mangrove} = (66,38 * ((\frac{\text{band3} - \text{band4}}{\text{band3} + \text{band4} - \text{band2}})^{2,104})) + (-46,1009 + 69,02285 * (\frac{1}{2} [2 * \text{band5} + 1 + \sqrt{(2 * \text{band5} + 1)^2 - 8 * (\text{band5} - \text{band4})}]))$$



+ 0,182429*(kedalaman sedimen) + 19,40405*(kerapatan lindak)

Model 3 estimasi biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dengan estimasi tanah menggunakan 2 variabel (indeks vegetasi yang sesuai MSAVI dan kedalaman sedimen). Hasil uji % RMSE 25,17 %.

$$\text{Karbon Mangrove} = (66,38 * ((\frac{\text{band3} - \text{band4}}{\text{band3} + \text{band4} - \text{band2}})^2, 104)) + (-13,91 + 20,54032 * (\frac{1}{2} [2 * \text{band5} + 1 - \sqrt{(2 * \text{band5} + 1)^2 - 8 * (\text{band5} - \text{band4})}])) + 0,26787 * (\text{kedalaman sedimen})$$

Model 4 penggabungan estimasi karbon biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dengan estimasi tanah menggunakan regresi berganda 2 variabel (indeks vegetasi MSAVI, nilai rata-rata kedalaman sedimen 100,63 cm). Hasil uji % RMSE sebesar 34,180%.

$$\text{Karbon Mangrove} = (66,38 * ((\frac{\text{band3} - \text{band4}}{\text{band3} + \text{band4} - \text{band2}})^2, 104)) + (-13,91 + 20,54032 * (\frac{1}{2} [2 * \text{band5} + 1 - \sqrt{(2 * \text{band5} + 1)^2 - 8 * (\text{band5} - \text{band4})}])) + 0,26787 * (\text{rata-rata kedalaman sedimen})$$



BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

1. Perbandingan biomassa antara mangrove muara dengan mangrove laut mencapai 1:1,8. Rata-rata kedalaman sedimen mangrove muara lebih dalam dari mangrove laut selisih 50,77 cm. Kerapatan lindak mangrove muara lebih besar dari mangrove laut selisih $0,16 \text{ g cm}^{-3}$. Perbandingan stok karbon tanah antara mangrove muara dengan laut mencapai 1,8:1. Perbandingan stok karbon biomassa (pohon, akar dan tanaman bawah) dengan karbon tanah mencapai 1:4,8 untuk mangrove campuran, untuk mangrove muara sebesar 1:9,1, dan mangrove laut mencapai 1:2,8.

2. Pemodelan menggunakan citra sentinel-2 terbaik untuk estimasi stok karbon biomassa vegetasi mangrove menggunakan indeks vegetasi NNIP (terdiri dari saluran merah, hijau dan *Near Infra Red*). Sedangkan untuk estimasi stok karbon tanah/sedimen menggunakan indeks vegetasi NDRE, WVVI, VIRRE (terdiri dari saluran *Near Infra Red* dan Red Edge). Pemodelan menggunakan citra LDCM terbaik untuk estimasi stok karbon biomassa vegetasi mangrove menggunakan indeks vegetasi VARI (merah, hijau dan biru). Sedangkan untuk estimasi stok karbon tanah/sedimen menggunakan indeks vegetasi RDVI, MSAVI (terdiri dari saluran merah dan *Near Infra Red*). Pemodelan estimasi stok karbon mangrove sebagai berikut :

Citra Sentinel-2 untuk estimasi stok karbon mangrove terbaik adalah model 1 dengan penggabungan antara estimasi stok karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri dan untuk estimasi stok karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel (indeks vegetasi NDRE atau WVVI, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah, % C kedalaman 0-15 cm, % C kedalaman 15-



50 cm dan %C kedalaman > 50 cm), dengan hasil uji % RMSE sebesar 16,12%. Sedangkan model yang tidak memerlukan data lapang adalah model 4, penggabungan antara persamaan indeks vegetasi NNIP regresi power/geometri menggunakan regresi power/geometri untuk estimasi stok karbon biomassa dan regresi berganda 3 variabel (indeks vegetasi VIRRE, nilai rata-rata kedalaman sedimen 100,63 cm, nilai kerapatan lindak tanah $1,02 \text{ g cm}^{-3}$) untuk estimasi stok karbon tanah. Hasil uji % RMSE sebesar 33,89%.

Citra LDCM untuk estimasi stok karbon terbaik adalah model 1 penggabungan estimasi stok karbon biomassa menggunakan persamaan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dan untuk estimasi stok karbon tanah menggunakan regresi berganda 6 variabel (indeks vegetasi RDVI, kedalaman sedimen, kerapatan lindak tanah, %C kedalaman 0-15 cm, %C kedalaman 15-50 cm dan %C kedalaman > 50 cm). Hasil uji % RMSE sebesar 9,58%. Sedangkan model yang tidak memerlukan data lapang adalah model 4, penggabungan estimasi stok karbon biomassa menggunakan indeks vegetasi VARI regresi power/geometri dan untuk estimasi stok tanah menggunakan regresi berganda 2 variabel (indeks vegetasi MSAVI dan nilai rata-rata kedalaman sedimen 100,63 cm). Hasil uji % RMSE 34,180%.

3. Perubahan stok karbon mangrove di Pulau Madura paling sesuai menggunakan model 4 untuk citra Landsat. Rata-rata pertambahan stok karbon mangrove di Pulau Madura dari tahun 1994-2002 sebesar 2.804,2 ton tahun⁻¹, tahun 2002-2017 sebesar 33.119,7 ton tahun⁻¹. Mangrove di Pulau Madura selama periode tahun 1994-2002 dapat menekan emisi CO₂ sebesar 82.356,0 ton atau 10.294,5 ton tahun⁻¹ dan pada periode 2002-2017



dapat menekan emisi CO₂ sebesar 1.820.200,0 ton atau 121.346,7 ton tahun¹.

6.2. Saran

Menggunakan model *hybrid* dengan citra satelit Sentinel-2 dan LDCM dapat digunakan untuk estimasi stok karbon mangrove total (stok karbon biomassa dan stok karbon tanah) dengan akurasi yang lebih baik, sehingga dapat diketahui besar emisi yang ditekan dengan keberadaan hutan mangrove.

Menggunakan model *hybrid* yang dihasilkan dalam penelitian ini dapat menghitung perubahan stok karbon mangrove dan besar emisi CO₂ yang mampu di tekan di Pulau Madura antara tahun 1994-2002-2017.