



Identifikasi model hubungan persen berat ukuran butiran dan stok karbon pada lapisan sedimen di ekosistem mangrove di Kota Tidore Kepulauan

Identification of model relationship between percent weight of grain size and carbon stock in sediment layer in mangrove ecosystem in Tidore Islands City

Anggita Yuniasari Hamzah*, Irmalita Tahir, Salnuddin, Rustam E Paembonan

Program Studi Ilmu kelautan, Fakultas Perikanan dan Kelautan Universitas Khairun

*E-mail : anggityuniasarihamzah@gmail.com

ABSTRAK

Ekosistem mangrove memiliki peran penting dalam menyimpan karbon dan menjaga keseimbangan lingkungan pesisir terutama pada wilayah kawasan hutan mangrove yang terbatas. Penelitian bertujuan untuk mengetahui model hubungan persen berat ukuran butiran sedimen dan stok karbon pada kawasan hutan mangrove di Kelurahan Rum Balibunga, Kota Tidore Kepulauan. Hasil analisis data disimpulkan bahwa model persamaan polynomial memberikan nilai akurasi yang lebih tinggi untuk menjelaskan hubungan persen ukuran butiran sedimen dan kadar stok karbon. Persen berat ukuran butiran 0,075 mm memberikan hubungan yang lebih baik (MAPE < 50%) pada lapisan anoksid, dibandingkan dengan lapisan oksid. Terdapat 5 nilai parameter stok karbon memberikan hubungan persen ukuran butiran dan stok karbon dengan nilai akurasi tinggi (MAPE < 10 %) yaitu pada parameter % bahan organik (%BO), % karbon, densitas C (gr/cm^3), kandungan C (gr/cm^3) dan berat abu bersih (gr).

Kata kunci : Sedimen, stok karbon, mangrove, MAPE,

ABSTRACT

Mangrove ecosystems have an important role in storing carbon and maintaining the balance of the coastal environment, especially in limited mangrove forest areas. The research aims to determine the relationship model between the weight percent of sediment grain size and carbon stock levels in an area in the mangrove forest area in Rum Balibunga Village. The results of data analysis concluded that the polynomial equation model provides a higher accuracy value to explain the relationship between the percent of sediment grain size and carbon stock levels. Percent weight of 0.075 mm grain size gives a better relationship (MAPE < 50%) in the anoxic layer, compared to the oxid layer. There are 5 values of carbon stock parameters that provide high accuracy (MAPE < 10%) for the relationship between percent grain size and carbon stock: % organic matter (%BO), % carbon, C density (gr/cm^3), C content (gr/cm^3) and net ash weight (gr).

Keyword : Carbon stocks, mangroves, MAPE, sediment

I, Pendahuluan

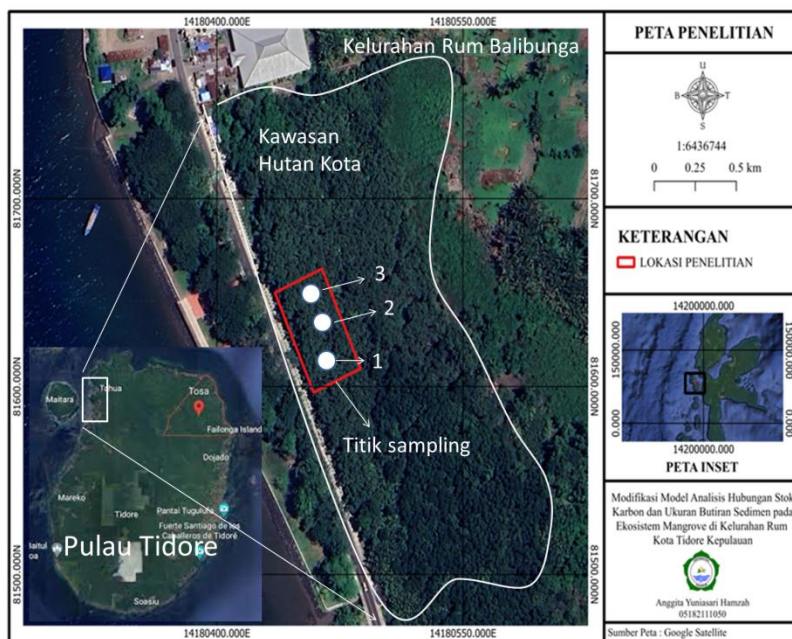
Karbon (C) adalah unsur kimia yang menjadi dasar kehidupan dan ditemukan dalam berbagai bentuk, seperti karbon dioksida (CO_2) di atmosfer serta bahan organik dalam tanah dan organisme (Peterson & Fry 1987), Siklus karbon mencakup proses



fotosintesis, respirasi, dekomposisi, serta penyimpanan dalam biomassa dan sedimen mangrove (Sippo *et al.* 2020), Ekosistem mangrove memiliki peran penting dalam menyimpan karbon dan menjaga keseimbangan lingkungan pesisir, Mangrove mampu menyerap karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer melalui proses fotosintesis dan menyimpannya dalam bentuk biomassa dan sedimen (Radabaugh *et al.* 2018), Potensi ini menjadikan mangrove sebagai salah satu komponen ekosistem utama dalam mitigasi perubahan iklim global (Donato *et al.* 2011, Alongi 2012) terutama untuk ekosistem yang berada pada daerah pantai dan estuari (Thorhaug *et al.* 2020) sebagaimana laporan IPPC (2007) menegaskan bahwa emisi karbon global harus ditekan secara drastis, dimana ekosistem mangrove menjadi salah satu solusi berbasis alam yang perlu dimaksimalkan (Arias *et al.* 2021) dan juga sesuai hasil penelitian ahli pada *Center for International Forestry Research* (CIFOR) tahun 2003 diketahui bahwa hutan mangrove dapat menyimpan karbon 800 – 1,200 ton/ha (Pangestika *et al.* 2023),

Stok karbon dalam ekosistem mangrove terdiri dari dua bagian, yaitu karbon biomassa dan karbon sedimen, Karbon biomassa tersimpan dalam batang, cabang, daun, dan akar, sementara karbon sedimen disimpan dalam lapisan tanah mangrove yang memiliki kapasitas penyimpanan dalam jangka panjang (Donato *et al.* 2011). Keberadaan karbon pada sedimen di hutan mangrove merupakan serangkaian proses yang saling berkaitan dan kompleks dari serangkaian mekanisme pembentukan karbon pada sistem tubuh tanaman mangrove (*carbon sink*) dan juga dari mekanisme penyusunan stuktur sedimen (Burdige 2020), Salah satu komponen yang penting atas keberadaan karbon adalah unsur sedimen dasar, pada sedimen terbentuk mekanisme kompleks dalam penyimpanan karbon (Rahman *et al.* 2017), Pada ekosistem mangrove pembentukan karbon yang dominan dikontrol oleh proses dekomposisi bahan organik (Kristensen *et al.* 2008) maupun mekanisme pelapukan sedimen (Schlesinger; & Bernhardt 2020), Mekanisme tersebut akan menciptakan karakter pada struktur ukuran butiran, dimana aktifitas pelapukan lebih optimum jika pelapukan terjadi disubstrat berukuran halus (Alongi 2012), sedangkan pada proses pelapukan sedimen akan menciptakan ukuran butiran yang lebih halus (Kauffman & Donato 2012, Bulmer *et al.* 2015),

Pulau Tidore sebagai pulau kecil dan gunung api mempunyai profil daratan dan pantai yang curam sekaligus sebagai pembatas penyebaran dan pertumbuhan mangrove, aspek lain juga ditunjukkan oleh kebutuhan ruang darat di pesisir untuk pembangunan sarana prasarana dengan terbentuknya perubahan fungsi lahan (Bates *et al.* 2012) dan yang menekan ruang ekosistem mangrove, Upaya antisipasi potensi yang terjadi di wilayah Kota Tidore Kepulauan, maka kawasan hutan mangrove di kelurahan Rum Balibunga, Kecamatan Tidore Utara sekitar 4 hektar sebagai hutan kota, sebagaimana SK Wali Kota Tidore Nomor 77,7 Tahun 2008 (Infopublik 2021), Hutan kota dengan vegetasi utama ekosistem mangrove tersebut, diharapkan terdapat stokkarbon yang signifikan, dimana Lovelock *et al.* (2011) menjelaskan bahwa sedimen berukuran halus, seperti lumpur, cenderung memiliki kapasitas lebih tinggi untuk menyimpan karbon dibandingkan sedimen berukuran kasar, seperti pasir,, Salah satu aspek penting dalam memahami potensi stokkarbon pada sedimen di kawasan mangrove adalah mengetahui model hubungan ukuran butiran sedimen dan kadar stokkarbon, guna memahami peran mangrove dalam mitigasi perubahan iklim dan pengelolaan lingkungan pesisir di suatu wilayah terutama pada kawasan hutan mangrove di Kelurahan Rum Balibunga, Kecamatan Tidore Utara Kota Tidore Kepulauan,



Gambar 1, Peta lokasi sampling

II. Metode Penelitian

Pengambilan data dan sampel dilakukan bulan Nopember 2024 di Kelurahan Rum Balibunga (Gambar 1). Pengambilan sampel sedimen menggunakan sedimen core berdiameter 3 inchi dengan panjang 30 cm merujuk pada mekanisme sampling yang dilakukan oleh Mahasani *et al.* (2015). Data kualitas perairan dan sedimen direkam secara langsung di lapangan (in situ) menggunakan instrumen standart untuk data pH, Kelembaban (%) pada sedimen, sedangkan untuk kualitas perairan berupa parameter salinitas (‰) dan suhu (°C). Sampel sedimen yang terkoleksi sebanyak 3 titik sampling dalam area 10 x 10 m. Sampel sedimen yang terkoleksi dipisahkan untuk lapisan permukaan mewakili lapisan oksid dari bagian tengah mewakili lapsian anoksid. Batas kedua lapisan tersebut didasarkan kondisi terang dan gelap dari struktur lapisan sedimen serta bau spesik dari sedimen. Sampel tersebut selanjutnya digunakan untuk analisis ukuran butiran (Granulometri) dan analisis stokkarbon.

2.1. Penanganan Data dan Sampel

Ukuran butiran diketahui melalui analisis granulometri menggunakan metode ayakan bertingkat (*Shieve Shaker*) pada sampel kering yang telah ditimbang sebagai berat awalnya. Tiap sampel diayak selama 3 menit dengan sembilan tingkatan mata siever yakni 4,75 (#4) mm, 2,00 (#10) mm, 1,18 (#16) mm, 0,850 (#20) mm, 0,425 (#40) mm, 0,250 (#60) mm, 0,150 (#100) mm, 0,075 (#200) mm dan >0,075 (>#200) mm. Sampel yang tertahan pada tiap tingkatan ayakan ditimbang beratnya untuk mendapatkan persen berat sampel tiap tingkatan., Ukuran butiran diklasifikasi berdasarkan skala Afnor (Tahir *et al.* 2023),

Istilah Stokkarbon pada penelitian ini digunakan agar memudahkan uraian tiap bagian dalam penanganan sampel dan data yang dihasilkan hingga menentukan kadar karbon disedimen. Penanganan sampel menerapkan metode *loss on ignition* (LOI)



sebagaimana petunjuk Howard *et al.* (2014). LOI adalah metode uji yang digunakan dalam kimia analitik anorganik dan ilmu tanah, khususnya dalam analisis mineral dan susunan kimiawi tanah, melalui kegiatan pengeringan sampel dalam *drying oven* dengan suhu 60°C selama 2 hari (48 jam), homogenisasi dan penghalusan sampel menggunakan mortar, pembakaran sampel (3 gram) menggunakan *muffle furnace/Tanur* dengan suhu 550°C selama 4 jam dan penguapan menggunakan disikator selama 5 menit sekaligus menormalkan suhu sampel.

2.2. Analisis Data

Analisis data dalam menentukan stokkarbon pada sedimen merujuk persamaan yang dikemukakan oleh Howard *et al.* (2014), dimana parameter dari stokkarbon terdiri dari *bulk density*, pengabuan kering, densitas karbon dan persentase karbon organik. Formula analisis parameter stokkarbon sebagai berikut:

1. Densitas tanah atau *bulk density* (BD), merupakan berat partikel persatuan volume tanah beserta porinya. Persamaan yang digunakan sebagai berikut.

$$\text{Soil Bulk Density } \left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{\text{oven drymass (g)}}{\text{sample volume (cm}^3\text{)}}$$

Keterangan: *Oven-dry mass* = Massa sampel yang dikeringkan (gram); *Sample volume* = Volume sampel (cm³),

2. Pengabuan Kering (*loss on ignition*) dihitung menggunakan persamaan :

$$\% \text{ BO} = \left(\frac{W_o - W_t}{W_o}\right) \times 100$$

Keterangan: %BO = Persentase bahan organik sedimen yang hilang pada proses pembakaran; *W_o* = Berat awal (3 gr), dan *W_t* = Berat akhir setelah pembakaran (gr),

3. Konversi persentase bahan organik ke persentase karbon menggunakan persamaan

$$\% \text{ C} = \frac{1}{1,724} \times \% \text{ BO}$$

Keterangan: %C = Kandungan karbon bahan sedimen organik; 1,724 = Konstanta untuk mengkonversi % BO menjadi %C organik,

4. Densitas karbon (C) dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\text{Soil C Density (g C/cm}^3\text{)} = \% \text{ C} \times \text{BD (densitas tanah)}$$

Keterangan: *Soil C Density* = densitas karbon

5. Kandungan karbon dalam sedimen dihitung dengan persamaan

$$\text{Soil C (g/cm}^2\text{)} = \text{BD} \times \text{SDI (Soil Depth Interval)} \times \% \text{ C ... (5)}$$

Keterangan: *Soil C* = Estimasi simpanan karbon dan *SDI* = Interval kedalaman sampel (cm),

6. Konversi g/cm² ke ton/ha menggunakan persamaan di bawah ini (Standar Nasional Indonesia, 2011),

$$C_{\text{tanah}} = C_t \times 100$$

Keterangan: *C_{tanah}* = kandungan karbon organik tanah per hektar, dinyatakan dalam ton per hektar (ton/ha); *C_t* = kandungan karbon tanah, dinyatakan dalam g/cm² 100 faktor konversi dari g/cm² ke ton/ha,



7. Persen berat ukuran butiran sedimen dianalisis dengan pendekatan matematis sederhana, ,

$$\% \text{ Berat} = \frac{\text{berat sampel \# tertentu (gr)}}{\text{Berat Total hasil ayakan}} \times 100 \%$$

Dimana # berat sampel sedimen pada tingkatan mata ayakan tertentu (1, 2,,n);

Hubungan antara persen berat ukuran butiran sedimen terhadap stokkarbon (kadar karbon) dilakukan dengan pendekatan statistik (regresi). Parameter analisis didasarkan atas kecenderungan perubahan nilai yang sama antara persen berat ukuran butiran dan nilai parameter dari stokkarbon. Kelayakan model analisis merujuk pada nilai koefisien determinasi ($R^2 \approx 1$) antara parameter bebas (X) untuk persen berat ukuran butiran dan parameter terikat (Y) dari kadar stok karbon pada sedimen. Model analisis regresi diharapkan mampu menjelaskan pola hubungan dari ukuran butiran dan keberadaan stokkarbon pada substrat sedimen di hutan mangrove. Secara umum model persamaan regresi tersebut sebagai berikut.

$$Y_n = \alpha \pm \beta X_1 \pm \beta X_2 \pm \beta X_n$$

dengan nilai Y_n = Nilai model (proyeksi) kadar stokkarbon; α = koefisien intersept, β = koefisien korelasi; X_1, X_2, \dots, X_n = Parameter berpengaruh bebas (X) dari persen berat ukuran butiran sedimen.

Akurasi model masing-masing model persamaan yang dihasilkan divalidasi dengan menentukan nilai *mean absolute percent error* (MAPE). Nilai MAPE < 10 % menunjukkan model dengan akurasi tinggi; MAPE bernilai 10 – 20 % dalam katagori akurasi yang baik; MAPE bernilai 20 – 50% dalam katagori logis dan nilai MAPE > 50 % dalam katagori tidak akurasi (Moreno *et al.* 2013). Nilai MAPE diformulasikan :

$$MAPE = \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{t=n} \frac{Y_n - Y_t}{Y_n} \right] \times 100\%$$

dengan t adalah waktu/periode; Y_t adalah nilai kadar stok karbon dari model persamaan (perkiraan) pada periode ke- t ; Y_n adalah nilai deret data faktuan pada periode ke- t ; n adalah banyaknya data

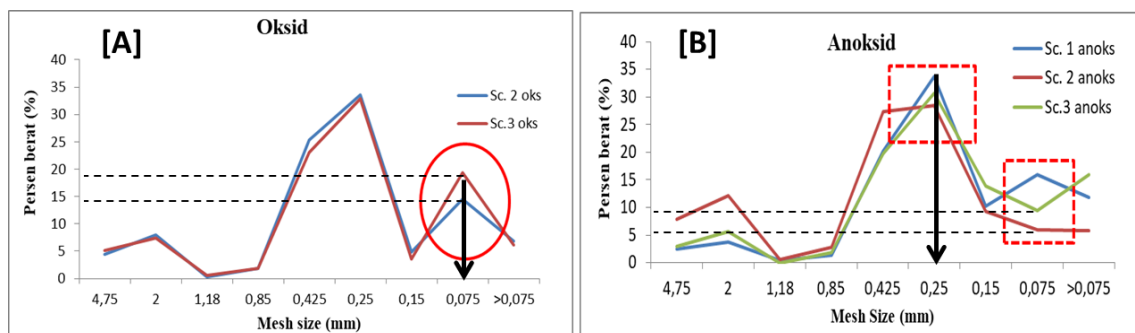
III. Hasil dan Pembahasan

Lokasi sampling di hutan wisata mangrove memiliki ekosistem mangrove yang cukup luas sekaligus telah dicanangkan sebagai kawasan hutan hijau di bagian utara Pulau Tidore, Areal sampling yang berada pada koordinat $0^{\circ}42'45,0''$ - $0^{\circ}42'44,67''$ LU dan $127^{\circ}23'30,0''$ - $127^{\circ}23'31,59''$ BT memiliki kondisi geografis khas ekosistem pesisir dengan vegetasi mangrove dominan jenis *Rhizophora sp*, *Avicennia sp* dan *Sonneratia sp* dengan topografi relatif datar dengan substrat pasir berlumpur. Parameter lingkungan berupa pH, kelembaban untuk kondisi sampel berair dan kering menunjukkan nilai pH masing sebesar 3 dan > 8. Kadar salinitas dan suhu perairan saat pergerakan air bergerak pasang (ABP) masing-masing 25 ppt dan 28 – 30 °C, Nilai kualitas perairan secara umum menunjukkan karakter yang dominan masih dipengaruhi oleh karakter air laut (Burdige 2020). Perubahan parameter pH saat kondisi tergenang dan kering menunjukkan nilai yang berbeda yang awalnya dalam kondisi asam menjadi kondisi basah (>8), kondisi tersebut diakibatkan oleh perlakuan dalam penanganan sampel, (substrat) yang direndam air tawar untuk menghilangkan kadar garam pada sampel.

3.1. Ukuran Butiran Sedimen

Sebaran persen ukuran butiran dari hasil analisis granulometri (Gambar 2), memperlihatkan persen ukuran butiran terbesar dari keseluruhan sampel dijumpai pada ukuran mata ayakan 0,25 mm atau dalam kategori pasir halus (warna abu-abu). Sedimen oksid (Gambar 2A) dijumpai ukuran butiran rata-rata ($D=50\%$) berada pada ukuran butiran 0,25 - 0,425 mm (pasir halus). Kondisi yang sama juga dijumpai pada sedimen anoksid untuk potongan 2 dan 3 (Gambar 2B), sedangkan pada potongan 1 ukuran butiran $D=50\%$ dijumpai pada ukuran butiran 0,25 - 0,85 mm.

Variasi persen berat antara sedimen lapisan oksid dan anoksid (Gambar 2) memperlihatkan perbedaan persen berat antar potongan sedimen, dimana pada lapisan sedimen oksid (Gambar 2A) perbedaan persen berat antar mata ayakan hanya dijumpai pada ukuran mata ayakan 0,75 mm (garis lingkaran merah), namun pada lapisan anoksid (Gambar 2B) variasi persen berat ditunjukkan pula pada ukuran mata ayakan 0,25 mm dan 0,75 mm (garis kotak merah). Variasi persen berat tersebut berpotensi menjadi parameter utama yang mengindikasikan keberadaan dan hubungan ukuran butiran sedimen dan stok karbon pada lapisan sedimen di kawasan hutan mangrove. Potensi tersebut merujuk pada pola variasi persen berat pada ukuran butira 0,25 mm dan 0,75 mm mempunyai pola yang sama dengan variasi kadar stokkarbon (Tabel 1).



Gambar 2, Fluktuasi persen berat ukuran butiran pada lapisan oksid dan anoksid dari lapisan sedimen

3.2. Stok Karbon

Hasil analisis berjenjang dari kandungan karbon dilakukan untuk mengetahui seberapa besar stok karbon yang tersimpan setiap lapisan sampel sedimen. Parameter stokkarbon yang dihasilkan terdiri dari 13 nilai terukur (Tabel 1). Variasi nilai parameter tersebut mengindikasikan nilai yang berbeda, dimana terdapat 6 parameter (baris kolom abu-abu) yang variasi kadarnya sama dengan variasi persen berat ukuran butiran berukuran 0,25 mm dan 0,75 mm. Variasi kadar stokkarbon diperlihatkan pada kandungan karbon organik (%BO) pada lapisan oksid lebih rendah dibandingkan lapisan anoksid. Proses oksidasi mempercepat dekomposisi bahan organik, menyebabkan karbon lebih cepat dilepaskan ke atmosfer dalam bentuk CO_2 . Kondisi tersebut dapat ditunjukkan dengan nilai persentase karbon pada lapisan oksid (Bulmer *et al.* 2015). Secara parsial tiap potongan sampel sedimen lapisan oksid, dengan parameter densitas tanah dan % BO tidak menunjukkan bahwa densitas material (tanah) yang besar akan mempunyai persen % BO yang tingipula. Kondisi tersebut ditunjukkan pada potongan sampel 1, dimana densitas kecil namun mempunyai % B) dan % karbon yang lebih tinggi. Karakteristik



umum dari % BO dan % karbon membentuk pola garis yang sejajar, dimana makin banyak kadar bahan organik (%BO) maka makin banyak pula % karbonnya,

Tabel 1. Nilai stokkarbon pada tiap lapisan dan potongan sampel sedimen.

NILAI	LAPISAN OKSID			LAPISAN ANOKSID		
	1	2	3	1	2	3
BB sedimen (gr)	93,47	137,09	144,29	126,03	182,06	105,05
BK sedimen (gr)	60,38	93,50	112,31	83,29	138,90	70,92
Berat Cawan (gr)	40,36	33,18	33,74	42,57	46,01	38,62
Cawan + sampel (gr)	43,36	36,59	49,58	36,36	45,95	41,83
Berat abu (gr)	43,11	36,45	49,26	36,22	45,70	41,54
Den. tanah (g/cm ³)	0,05	0,08	0,10	0,07	0,12	0,06
%Bahan Organik (%)	42,36	35,59	48,58	35,36	44,95	40,83
% Karbon (%)	24,57	20,64	28,18	20,51	26,07	23,68
Density C (gr/cm ³)	1,30	1,69	2,77	1,50	3,17	1,47
Kandungan C (g/cm ²)	14,29	35,50	56,82	16,46	66,61	30,15
C tanah (ton/cm ²)	1429,06	3549,72	5681,98	1645,78	6661,18	3015,34
Konversi (ton/ha)	1,42*	3,55*	5,68*	1,65*	6,66*	3,02 *
Berat Abu Bersih (gr)	2,75	3,27	15,52	-6,35	-0,30	2,92

Keterangan :BB = berat basah; BK= berata kering; Den. tanah = densitas tanah, * = $\times 10^{11}$

Kadar stokkarbor untuk parameter berat abu bersih, kandungan karbon serta densitas karbon (Tabel 1) menunjukkan informasi yang hampir sama dengan parameter kadar stokkarbon %BO. Kandungan karbon pada titik sampel 1 mempunyai nilai yang berpotongan dengan nilai densitas C, kondisi tersebut menunjukkan bahwa densitas C yang tinggi tidak diikuti dengan kandungan karbon itu sendiri. Secara umum variasi kadar stokkarbon antara titik sampel untuk parameter densitas C dan berat abu bersih membentuk garis sejajar dengan jarak antar nilai pada potongan sampel 3 lebih besar dibandingkan kedua potongan sampel lainnya.

Kandungan % BO berdasarkan pada lapisan sedimen pada lapisan anoksid lebih tinggi dibandingkan lapisan oksid. Kondisi tersebut akibat lingkungan anaerobik memperlambat proses dekomposisi bahan organik dimana lapisan oksid yang masih terdapat oksigen, proses dekomposisi material organik lebih dipicu oleh aspek biofisik lingkungan, sedangkan pada lapisan anoksid dengan minim kadar oksigen (Canfield 1993), pelapukan material dominan dikontrol oleh mekanime kimiawi dari aktifitas mikrobakteri (Fatma *et al.* 2023). Kondisi tersebut menyebabkan banyak karbon yang tersimpan dalam jangka panjang disedimen, Persentase karbon pada lapisan anoksid memperlihatkan nilai kadar parameter pada lapisan oksid dan anoksid menunjukkan adanya nilai yang relatif sama (< 50%) untuk parameter % BO dan % kadar karbon, namun pada nilai kadar berat abu da kandungan C lebih besar pada lapisan anoksid dibandingkan lapisan oksid, Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pembentukan karbon di lapisan anoksid lebih besar dibandingkan pada lapisan oksid (Canfield 1993). Perbedaan lainnya ditunjukkan pada nilai stokkarbon lapisan oksid dominan pada titik potongan sampel 3, sedangkan pada lapisan anoksid bergeser ke potongan sampel 2.

3.3. Hubungan Ukuran Butiran Sedimen dan Stok Karbon

Analisis regresi digunakan untuk memahami hubungan antara ukuran butiran sedimen dan parameter stokkarbon, Tingkat korelasi hubungan tersebut diketahui dengan memperhatikan nilai dari koefisien determinasi ($R^2 > 75\%$) dari dua pendekatan analisis regresi yakni linear dan polynomial. Ukuran butiran sedimen yang digunakan sebagai salah satu komponen persamaan adalah ukuran butiran yang mempunyai pola variasi persen berat sama dengan pola dari parameter stokkarbon, Hasil identifikasi ukuran butiran tersebut dijumpai pada ukuran butiran 0,075 mm sampel sedimen oksid, sedangkan pada sampel sedimen anoksid dijumpai dua ukuran butiran membentuk variasi nilai yakni pada ukuran butiran 0,075 mm dan 0,25 mm (Gambar 3).

Hubungan parameter ukuran butiran dan stokkarbon lapisan oksid (Tabel 2), tidak dapat memberikan informasi yang detail, akibat jumlah data sangat kecil. persamaan tersebut memperlihatkan adanya hubungan positif ($b = \text{positif}$), yang berarti makin besar persen berat ukuran butiran 0,25 mm maka makin besar nilai parameter stokkarbon. Persamaan linear yang dihasilkan hanya dapat diartikan bahwa ada hubungan persen berat ukuran butiran terhadap stokkarbon dan tidak dapat menggambarkan besarnya kontribusi persen berat ukuran butiran 0,25 mm terhadap nilai stokkarbon namun menunjukkan fenomena umum bahwa semakin kecil ukuran sedimen, semakin tinggi kandungan karbon organiknya (Atwood *et al.* 2020),

Tabel 2. Hubungan Persen berat ukuran butiran sedimen dan stok karbon pada lapisan oksid melalui pendekatan analisis regresi linear dan polynomial

Parameter (N = 2)	# 0,25 mm						
	Linear			Polynomial			
	a	b	R ²	α	βX	βX ²	R ²
Den, Tanah (gr/cm ³)	0,031	0,003	1	0,031	0,003	-	1
%BO (%)	-4,307	2,733	1	-4,307	2,733	-	1
% Karbon (%)	-2,498	1,585	1	-2,498	1,585	-	1
Den. C (g C/cm ³)	-1,631	0,227	1	-1,631	0,227	-	1
Kan. C (g/cm ²)	-29,99	4,487	1	-29,99	4,487	-	1
BA Bersih (gr)	-34,35	2,577	1	34,35	2,577	-	1

Keterangan :n = banyaknya data; # = ukuran mata ayakan; a dan α = koefisien intersept, b dan β = koefisien korelasi, R² = koefisien determinan, Den. tanah = densitas tanah; % BO = persen bahan organik; Den, C = densitas carbon; Kan C = Kandungan Carbon; BA Bersih = berat abu bersih.

Hasil analisis hubungan secara statistik dengan model regresi linear (Tabel 3) menunjukkan hubungan yang bervariasi antara parameter stokkarbon dengan persen berat ukuran butiran 0,25 mm dan 0,075 mm, Model hubungan antar parameter secara regresi linear kedua ukuran butiran menunjukkan fenomena yang sama, dimana seluruh parameter mempunyai nilai korelasi negatif ($b = \text{minus}$) dengan nilai koefisien determinasi (R^2) masing-masing parameter stokkarbon yang berbeda. Parameter densitas tanah, densitas C dan berat abu bersih mempunyai nilai $R^2 < 0,75$ sedangkan parameter %BO, % Karbon dan Kandungan C mempunyai nilai yang lebih tinggi ($R^2 > 0,75$). Nilai $R^2 > 0,75$ tersebut menunjukkan bahwa adanya hubungan yang kuat antara parameter persen berat dari ukuran butiran dan parameter stokkarbon, sedangkan nilai koefisien regresi (b) mengindikasikan bahwa makin besar persen berat ukuran butiran maka makin



kecil nilai stokkarbon pada lapisan sedimen anoksid. Kondisi tersebut sejalan dengan (Bulmer *et al.* 2015) yang menjelaskna bahwa sedimen lumpur dan pasir sangat halus pada ekosistem mangrove memiliki kandungan karbon tertinggi dan lebih stabil dalam menyimpan karbon dibandingkan lapisan oksid.

Tabel 3. Hubungan persen berat ukuran butiran dan stok karbon sedimen pada lapisan anoksid melalui pendekatan regresi linear.

Parameter (N = 3)	# 0,25 mm			# 0,075 mm		
	a	b	R ²	a	b	R ²
Den. Tanah (gr/cm ³)	0,347	-0,008	0,5	0,127	-0,004	0,419
%BO (%)	96,6	-1,816	0,999	50,22	-0,943	0,991
% Karbon (%)	56,03	-1,053	0,999	29,13	-0,547	0,991
Den. C (g C/cm ³)	11,27	-0,298	0,656	3,568	-0,145	0,577
Kan. C (g/cm ²)	322,6	-9,205	0,884	86,21	-4,645	0,828
BA Bersih (gr)	37,71	-1,258	0,502	6,132	-0,707	0,582

Keterangan :n = banyaknya data; # = ukuran mata ayakan; a = koefisien intersept, b = koefisien korelasi, R² = koefisien determinan. Den. tanah = densitas tanah; % BO = persen bahan organik; Den, C = densitas carbon; Kan C = Kandungan Carbon; BA Bersih = berat abu bersih.

Analisis regresi dengan model polynomial pada sampel sedimen anoksid memperlihatkan nilai yang berbeda dengan pendekatan linear (Tabel 3). Model polynomial, keseluruhan persamaan memberikan nilai R² = 1, atau data yang menyusun persamaan memberikan kontribusi yang sangat baik (100%) atau keseluruhan persamaan menunjukkan proses analisis yang sempurna. Nilai persamaan polynomial menunjukkan pola grafik kecendrungan linear dan juga hiperbolik. Nilai persamaan (polynomial) memperlihatkan pola perubahan nilai stokkarbon mempunya pola yang sama untuk persamaan dari pengaruh persen berat ukuran butiran 0,25 mm dan 0,075, dimana perubahan tersebut diperlihatkan pada nilai koefisien korelasi βX bernilai negatif, sehingga dominan makin besar persen berat ukuran butiran, maka makin berkurang kandungan stokkarbon. Kondisi yang berbeda ditunjukkan pada persamaan nilai berat abu bersih, dimana persamaan menunjukkan adanya peningkatan stokkarbon seiring bertambahnya persen berat ukuran butiran sedimen (β = positif).

Nilai koefisien korelasi β untuk variabel X² (βX^2) memberikan fungsi yang berlawanan dari nilai koefisien korelasi β untuk variabel X (βX) dengan nilai jauh lebih kecil dari nilai koefisien βX . Kontribusi koefien βX^2 menjelaskan ada faktor lain yang ikut bersama dengan parameter X sebagai persen berat ukuran butiran sedimen yang menyebabkan stokkarbon bertamhan (β nilai positif). Secara statistik model persamaan linear dan polynomial menginformasikan tentang peran data, namun kedua persamaan memberikan informasi yang berbeda terhadap stokkarbon akibat perubahan nilai parameter persen berat ukuran butiran sedimen.

Tabel 4. Hubungan stok karbon dan ukuran butiran sedimen pada lapisan anoksid melalui pendekatan regresi polynomial.

Parameter (N = 3)	# 0,25 mm				# 0,075 mm			
	α	βX	βX^2	R ²	α	βX	βX^2	R ²



Den, Tanah (gr/cm ³)	5,893	-0,366	0,005	1	0,326	-0,045	0,001	1
%BO	107,8	-2,542	0,011	1	53786	-1,688	0,0344	1
% Karbon	62,56	-1,474	0,006	1	31,198	-0,979	0,0194	1
Den. C (g C/cm ³)	152,6	-9,418	0,146	1	8,771	-1,233	0,048	1
Kan. C (g/cm ²)	2498,3	-149,5	2,252	1	174,3	-23,08	0,826	1
BA Bersih	-783,4	51,71	-0,850	1	-18,83	4,514	-0,234	1

Keterangan : n = banyaknya data; # = ukuran mata ayakan; a = koefisien intersept, b = koefisien korelasi, R² = koefisien determinan

3.4. Uji Akurasi Model Hubungan Ukuran Butiran Sedimen dan Stok Karbon

Model persamaan statistik model linear dan polynomial memberikan nilai persamaan yang berbeda (Tabel 3) dan membutuhkan perhitungan uji akurasi menggunakan nilai *mean absolute percent error* (MAPE). Perhitungan nilai MAPE pada lapisan oksid umumnya MAPE > 50 % (Tabel 4) yang berarti bahwa model persamaan tidak akurat (angka miring), kondisi tersebut dapat dimaklumi mengingat data yang menyusun persamaan sangat minim (3 data). Nilai MAPE berdasarkan lapisan sedimen menunjukkan bahwa pada lapisan anoksid mempunyai persamaan dengan akurasi yang lebih baik dibandingkan dengan lapisan oksid.

Tabel 5. Nilai *mean absolute percent error* (MAPE) dari model analisis hubungan persen berat ukuran butiran sedimen dan stok karbon.

Parameter Y	Linear				Polynomial			
	# 0,25 mm		# 0,075 mm		# 0,25 mm		# 0,075 mm	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Den, tanah (g/cm ³)	46,24	21,79	-	60,75	46,24	64,30	-	46,02
% BO (%)	110,74	0,06	-	31,94	110,74	61,51	-	0,10
% Karbon (%C)	110,70	0,06	-	31,94	110,70	64,47	-	0,01
Den, C (gr/cm ³)	182,17	18,87	-	92,48	182,17	36,61	-	1,66
Kan C (g/cm ²)	173,15	14,05	-	151,89	173,15	119,86	-	0,20
BA Bersih (gr)	860,46	287,30	-	-1288,73	860,46	6,66	-	-1,34

Keterangan : Jumlah data (N) pada lapisan oksid sebanyak 2 data dan pada lapisan anoksid sebanyak 3 data, nilai MAPE untuk lapisan oksid dari model linear dan polynomial yang sama; A = lapisan oksid; B = Lapisan anoksid; Den. tanah = densitas tanah; % BO = persen bahan organik; Den, C = densitas carbon; Kan C = Kandungan Carbon; BA Bersih = berat abu bersih.

Kondisi tersebut sesuai dengan penjelasan Atwood *et al.* (2020) yang menjelaskan peran mikrobakterial pada lapisan anoksid dalam produksi karbon pada lapisan sedimen. Model persamaan untuk parameter %BO, % karbon, densitas C (gr/cm³) dan kandungan C (gr/cm²) mempunyai akurasi yang sangat baik (MAPE < 20%) pada lapisan sedimen anoksid (bolt). Persamaan dengan katagori akurasi baik (miring) diperlihatkan pada densitas tanah (gr/cm³) dikedua lapisan dengan model linear, parameter %BO dan % karbon pada lapisan anoksid, sedangkan untuk model linear dijumpai pada parameter densitas C (gr/cm³) dikedua lapisan. Persen berat ukuran butiran 0,075 mm mempunyai akurasi yang lebih baik dibandingkan pada ukuran butiran 0,25 mm.



IV. Kesimpulan

Hasil analisis data disimpulkan bahwa model persamaan polynomial memberikan nilai akurasi yang lebih tinggi untuk menjelaskan hubungan persen ukuran butiran sedimen dan kadar stokkarbon. Persen berat ukuran butiran 0,075 mm memberikan hubungan yang lebih baik (MAPE < 50%) pada lapisan anoksid, dibandingkan dengan lapisan oksid. Terdapat 5 nilai parameter stokkarbon memberikan hubungan persen ukuran butiran dan stokkarbon dengan nilai akurasi tinggi (MAPE < 10 %) yaitu pada parameter % bahan organik (%BO), % karbon, densitas C (gr/cm³), kandungan C (gr/cm³) dan berat abu bersih (gr).

Daftar Pustaka

- Alongi DM. 2012. Carbon sequestration in mangrove forests. . *Carbon Management* 3(3):313 - 322.doi:<https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>.
- Arias P, Bellouin N, Coppola E, Jones R, Krinner G, Marotzke J, Naik V, Palmer M, Plattner G-K, Rogelj J. 2021. Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; technical summary.
- Atwood TB, Witt A, Mayorga J, Hammill E, Sala E. 2020. Global patterns in marine sediment carbon stocks. *Frontiers in Marine Science*. 7:165.doi:<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00165>.
- Bates N, Best M, Neely K, Garley R, Dickson A, Johnson R. 2012. Detecting anthropogenic carbon dioxide uptake and ocean acidification in the North Atlantic Ocean. *Biogeosciences*. 9(7):2509-2522.doi:<https://doi.org/10.5194/bg-9-2509-2012>.
- Bulmer RH, Lundquist C, Schwendenmann L. 2015. Sediment properties and CO₂ efflux from intact and cleared temperate mangrove forests. *Biogeosciences*. 12(20):6169-6180.doi:<https://doi.org/10.5194/bg-12-6169-2015>.
- Burdige DJ. 2020. *Geochemistry of marine sediments*. Princeton University Press 164p
- Canfield DE. 1993. Organic Matter Oxidation in Marine Sediments. Di Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. hlm 333-363.https://doi.org/10.1007/978-3-642-76064-8_14; 978-3-642-76064-8
- Donato DC, Kauffman JB, Murdiyarso D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*. 4(5):293-297.doi:<https://doi.org/10.1038/ngeo1123>.
- Fatma YS, Lesmana D, Handayani L, Sulistyorini E, Arrasyid B, Soimin M, Gaffar S, Nisa SAR, Hardiyanti Y, Hati RP. 2023. *Mikrobiologi Lingkungan TOHAR MEDIA*.^{6238148764^}
- Howard J, Hoyt S, Isensee K, Telszewski M, Pidgeon E. 2014. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. Di dalam: Intergovernmental oceanographic commission of UNESCO. Arlinton, USA. 180 p.
- Infopublik (2021). Hutan Mangrove Rum Balibunga Terabaikan. <https://infopublik.id/kategori/nusantara/506320/hutan-mangrove-rum-balibunga-terabaikan> Januari 2025.
- IPPC. 2007. Change on Climate. Intergovernmental panel on climate change. *World Meteorological Organization*. 52:1-43



- Kauffman JB, Donato DC. 2012. *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*. Cifor Bogor, Indonesia
- Kristensen E, Bouillon S, Dittmar T, Marchand C. 2008. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: a review. *Aquatic botany*. 89(2):201-219. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.005>.
- Lovelock CE, Ruess RW, Feller IC. 2011. CO₂ efflux from cleared mangrove peat. *PLoS one*. 6(6):e21279 doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021279>.
- Mahasani I, Widagti N, Karang I. 2015. Estimasi persentase karbon organik di hutan mangrove bekas tambak, Perancak, Jembrana, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*. 1(1):14-18. doi:<https://doi.org/10.24843/Jmas.2015.V>
- Moreno JJM, Pol AP, Abad AS, Blasco BC. 2013. Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema*. 25(4):500-506. doi:<https://doi.org/10.7334/psicothema2013.23>.
- Pangestika MA, Soenardjo N, Pramesti R. 2023. Estimasi Simpanan Karbon Sedimen Mangrove di Hutan Mangrove Kecamatan Ayah, Kabupaten Kebumen. *Journal of Marine Research*. 12(1):89-94. doi:<https://doi.org/10.14710/jmr.v12i1.31965>.
- Peterson BJ, Fry B. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual review of ecology and systematics*. 293-320..
- Radabaugh KR, Moyer RP, Chappel AR, Powell CE, Bociu I, Clark BC, Smoak JM. 2018. Coastal blue carbon assessment of mangroves, salt marshes, and salt barrens in Tampa Bay, Florida, USA. *Estuaries and Coasts*. 41:1496-1510. doi:<https://doi.org/10.1007/s11273-015-9475-6>.
- Rahman R, Effendi H, Rusmana I. 2017. Estimasi stok dan serapan karbon pada mangrove di Sungai Tallo, Makassar. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 11(1):19-28. doi:<https://doi.org/10.22146/jik.24867>.
- Schlesinger; WH, Bernhardt ES. 2020. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change (4th ed.)*. . Academic Press
- Sippo JZ, Sanders CJ, Santos IR, Jeffrey LC, Call M, Harada Y, Maguire K, Brown D, Conrad SR, Maher DT. 2020. Coastal carbon cycle changes following mangrove loss. *Limnology and oceanography*. 65(11):2642-2656. doi:<https://doi.org/10.1002/lno.11476>.
- Tahir I, Mantiri DM, Rumengan AP, Muhammad A, Ismail F, Paembonan RE, Najamuddin N, Akbar N, Inayah I, Wibowo ES. 2023. Simpanan karbon sedimen di bawah tegakan spesies mangrove alami dan mangrove rehabilitasi. *Jurnal Ilmu Kelautan Kepulauan*. 6(1).
- Thorhaug A, Gallagher JB, Kiswara W, Prathep A, Huang X, Yap T-K, Dorward S, Berlyn G. 2020. Coastal and estuarine blue carbon stocks in the greater Southeast Asia region: Seagrasses and mangroves per nation and sum of total. *Marine Pollution Bulletin*. 160:111-168.