

## HUBUNGAN ANTARA STRUKTUR VEGETASI, REGENERASI ALAMI DAN KARBON SEDIMEN DALAM EKOSISTEM MANGROVE DI KOTA SORONG PAPUA BARAT DAYA

Syarif Ohorella<sup>1</sup>, Syaiful Maliki Arif<sup>1</sup>, Rima H Siburian<sup>2</sup>, Ihsan Febriadi<sup>1</sup>, Zulkarnaen Sangadji<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Kehutanan, Universitas Muhammadiyah Sorong

<sup>2</sup>Program Studi Kehutanan, Universitas Papua

<sup>3</sup>Program Studi Agroteknologi Universitas Muhammadiyah Sorong

Email: [agrohut@gmail.com](mailto:agrohut@gmail.com)

### Abstrak

Ekosistem mangrove berperan penting dalam penyerapan karbon, bertindak sebagai penyerap karbon yang signifikan di daerah pesisir tropis. Studi ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara struktur vegetasi, regenerasi alami, dan penyimpanan karbon dalam sedimen di hutan mangrove Kota Sorong, Papua Barat Daya, Indonesia. Data mengenai komposisi spesies, kepadatan semaian, dan kandungan karbon sedimen dikumpulkan dari tiga stasiun dengan tingkat regenerasi yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi positif antara kepadatan regenerasi dan penyimpanan karbon dalam sedimen, di mana stasiun dengan tingkat regenerasi sedang (1.000–3.000 semaian/ha) menyimpan lebih banyak karbon (10.718,42–10.946,87 gC/m<sup>2</sup>) dibandingkan stasiun dengan regenerasi rendah (<1.000 semaian/ha; 10.431,71 gC/m<sup>2</sup>). Temuan ini menunjukkan bahwa regenerasi alami secara signifikan mempengaruhi retensi karbon dalam sedimen, kemungkinan karena kontribusi bahan organik dari guguran daun dan akumulasi biomassa akar. Studi ini menekankan pentingnya menjaga dan merestorasi hutan mangrove untuk meningkatkan kapasitas penyerapan karbonnya. Strategi konservasi harus memprioritaskan pemeliharaan struktur regenerasi yang seimbang guna mengoptimalkan potensi penyimpanan karbon. Hasil penelitian ini berkontribusi pada diskusi lebih luas mengenai solusi berbasis alam dalam mitigasi perubahan iklim melalui pengelolaan ekosistem mangrove.

**Kata kunci:** stok karbon, hutan mangrove, regenerasi alami, karbon sedimen, struktur vegetasi

### Abstract

Mangrove ecosystems play a crucial role in carbon sequestration, functioning as significant carbon sinks in tropical coastal areas. This study aimed to analyze the relationship between vegetation structure, natural regeneration, and sediment carbon storage in mangrove forests of Sorong City, Southwest Papua, Indonesia. Data on species composition, seedling density, and sediment carbon content were collected from three stations representing different regeneration levels. The results revealed a positive correlation between regeneration density and sediment carbon storage, where stations with moderate regeneration (1,000–3,000 seedlings ha<sup>-1</sup>) stored higher carbon stocks (10,718.42–10,946.87 gC m<sup>-2</sup>) compared to stations with low regeneration (<1,000 seedlings ha<sup>-1</sup>; 10,431.71 gC m<sup>-2</sup>). These findings indicate that natural regeneration significantly influences sediment carbon retention, likely due to organic matter inputs from litterfall and root biomass accumulation. The study highlights the importance of conserving and restoring mangrove forests to enhance their carbon sequestration capacity. Conservation strategies should prioritize maintaining balanced regeneration structures to optimize carbon storage potential. These results contribute to the broader discussion on nature-based solutions for climate change mitigation through sustainable mangrove ecosystem management.

**Keywords:** carbon stock, mangrove forest, natural regeneration, sediment carbon, vegetation structure

---

## PENDAHULUAN

Hutan mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peran penting dalam siklus karbon global, bertindak sebagai penyerap karbon (carbon sink) yang sangat efisien dibandingkan dengan ekosistem darat lainnya (Donato et al., 2011; Alongi, 2014). Mangrove menyimpan karbon dalam biomassa di atas permukaan tanah (aboveground biomass, AGB), biomassa bawah tanah (belowground biomass, BGB), serta dalam sedimen yang dapat bertahan selama ratusan hingga ribuan tahun (Kauffman et al., 2011; Murdiyarso et al., 2015). Kemampuan mangrove dalam menyerap dan menyimpan karbon menjadikannya sebagai elemen kunci dalam strategi mitigasi perubahan iklim berbasis ekosistem (Alongi, 2014; Howard et al., 2017).

Meskipun ekosistem mangrove hanya menutupi sekitar 0,7% dari total luas hutan tropis dunia, mereka menyimpan hingga 10 kali lebih banyak karbon per hektar dibandingkan dengan hutan hujan tropis (Donato et al., 2011; Hamilton & Friess, 2018). Namun, deforestasi dan konversi lahan mangrove akibat aktivitas antropogenik telah menyebabkan peningkatan emisi karbon signifikan, yang diperkirakan mencapai 122 juta ton CO<sub>2</sub> per tahun (Hamilton & Friess, 2018; Otero et al., 2021). Oleh karena itu, pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor yang mempengaruhi penyimpanan karbon dalam ekosistem mangrove sangat penting untuk upaya konservasi dan restorasi.

Struktur vegetasi merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi kapasitas penyimpanan karbon dalam ekosistem mangrove. Parameter seperti kepadatan pohon, luas bidang dasar, dan komposisi spesies sangat menentukan seberapa besar karbon yang dapat disimpan oleh ekosistem ini (Lovelock et al., 2017; Sidik et al., 2018). Spesies mangrove dengan sistem perakaran yang luas, seperti *Rhizophora* spp., diketahui mampu meningkatkan stabilitas sedimen dan mempercepat akumulasi karbon organik di dalam tanah (Alongi & Mukhopadhyay, 2015; Adame et al., 2018).

Selain itu, regenerasi alami memainkan peran penting dalam menjaga keberlanjutan ekosistem mangrove. Kepadatan regenerasi alami, yang mencakup jumlah semaian dan anakan per satuan luas, dapat memengaruhi tingkat input bahan organik ke dalam sedimen, baik dari guguran daun, akar yang membusuk, maupun serasah organik lainnya (Friess et al., 2019; Lovelock & Reef, 2020). Studi sebelumnya menunjukkan bahwa regenerasi yang tinggi dikaitkan dengan peningkatan produksi biomassa bawah tanah, yang berkontribusi pada peningkatan akumulasi karbon dalam sedimen (Kauffman et al., 2011; Simard et al., 2019). Namun, ada juga penelitian yang menunjukkan bahwa kepadatan regenerasi yang

sangat tinggi dapat menghambat pertumbuhan pohon dewasa, mengurangi stabilitas ekosistem, serta menyebabkan peningkatan dekomposisi bahan organik, yang pada akhirnya dapat mengurangi efisiensi penyimpanan karbon (McKee et al., 2007; Sanders et al., 2016).

Meskipun telah banyak penelitian mengenai peran mangrove dalam penyimpanan karbon, masih terdapat kesenjangan pengetahuan mengenai bagaimana interaksi antara struktur vegetasi dan regenerasi alami memengaruhi stok karbon sedimen di hutan mangrove tropis. Sebagian besar studi sebelumnya hanya berfokus pada salah satu aspek, seperti biomassa di atas tanah (AGB) atau cadangan karbon tanah (SOC), tanpa menghubungkan keduanya secara komprehensif dalam konteks regenerasi alami (Murdiyarso et al., 2015; Sidik et al., 2018). Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami bagaimana kombinasi antara struktur vegetasi dan dinamika regenerasi alami dapat mempengaruhi stok karbon sedimen, terutama dalam ekosistem mangrove yang mengalami berbagai tingkat regenerasi.

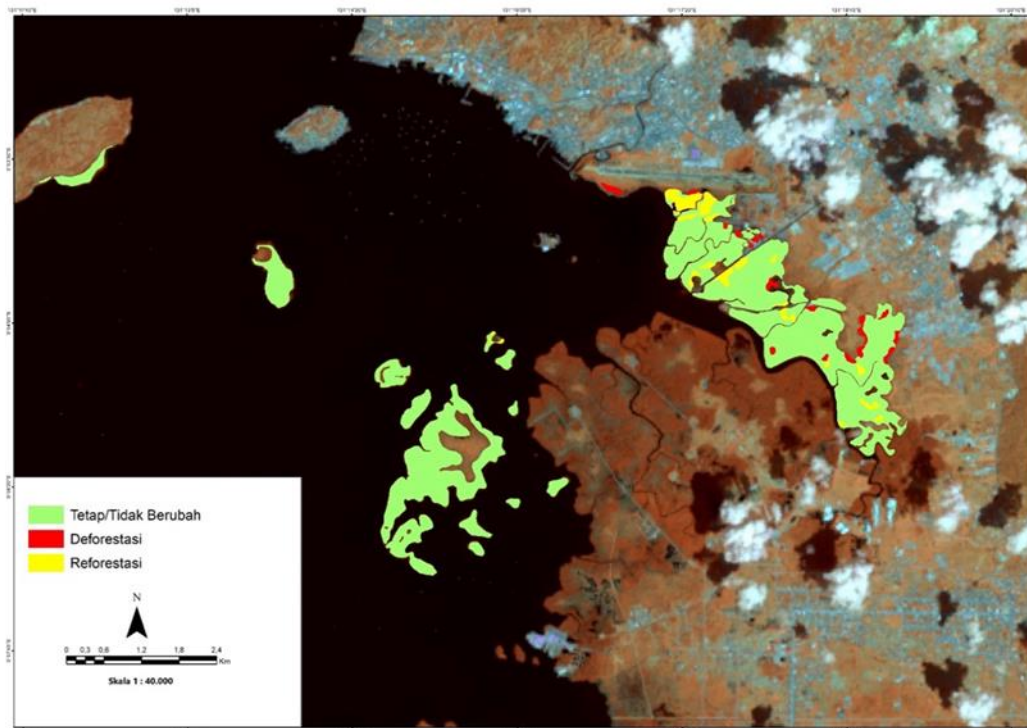
Penelitian ini dilakukan di hutan mangrove Kota Sorong, Papua Barat Daya, Indonesia, yang merupakan salah satu wilayah pesisir yang masih memiliki tutupan mangrove yang relatif luas, namun mulai mengalami fragmentasi ekosistem akibat tekanan antropogenik (Murdiyarso et al., 2015). Studi ini bertujuan untuk: 1) Menganalisis hubungan antara struktur vegetasi, kepadatan regenerasi alami, dan stok karbon sedimen dalam ekosistem mangrove tropis. 2) Mengidentifikasi faktor dominan yang berkontribusi terhadap penyimpanan karbon dalam sedimen. 3) Memberikan wawasan untuk strategi konservasi dan pengelolaan mangrove dalam rangka mendukung penyerapan karbon dan mitigasi perubahan iklim.

Berdasarkan tinjauan literatur dan hasil penelitian sebelumnya, kami menghipotesiskan bahwa: 1) Kepadatan regenerasi alami berkorelasi positif dengan stok karbon sedimen, di mana regenerasi yang lebih tinggi berkontribusi terhadap peningkatan biomassa bawah tanah dan input bahan organik ke dalam sedimen. 2) Struktur vegetasi (komposisi spesies dan luas bidang dasar) secara signifikan mempengaruhi akumulasi karbon dalam sedimen, di mana ekosistem yang didominasi oleh spesies dengan sistem perakaran yang luas memiliki tingkat penyimpanan karbon yang lebih tinggi dibandingkan ekosistem dengan struktur vegetasi yang lebih sederhana.

## METODE PENELITIAN

### Lokasi dan Desain Penelitian

Penelitian ini dilakukan di hutan mangrove Kota Sorong, Papua Barat Daya, Indonesia ( $0^{\circ}53'S$ ,  $131^{\circ}15'E$ ). Wilayah ini memiliki iklim tropis dengan curah hujan tahunan 2.500–3.000 mm dan suhu rata-rata  $26\text{--}30^{\circ}\text{C}$ . Mangrove di area penelitian didominasi oleh *Rhizophora* spp., *Avicennia* spp., *Bruguiera* spp., dan *Xylocarpus* spp., yang memiliki peran penting dalam penyimpanan karbon dan perlindungan pesisir (FAO, 2007; Alongi, 2014).



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Untuk mengevaluasi hubungan antara struktur vegetasi, regenerasi alami, dan karbon sedimen, tiga stasiun penelitian dipilih berdasarkan tingkat regenerasi alami dan kondisi lingkungan. Pemilihan lokasi didasarkan pada pengamatan lapangan dan studi terdahulu (Donato et al., 2011; Kauffman et al., 2011).

### Pengukuran Struktur Vegetasi dan Regenerasi Alami

Struktur vegetasi dianalisis menggunakan metode plot bersarang (nested plot) yang mengacu pada FAO (2007). Setiap stasiun memiliki tiga plot utama berukuran  $10 \times 10$  m untuk pengukuran kepadatan pohon dan luas bidang dasar (basal area, BA). Di dalamnya,

sub-plot  $5 \times 5$  m digunakan untuk menghitung kepadatan tiang (sapling density), dan kuadran  $1 \times 1$  m digunakan untuk enumerasi semai (seedling count) (Cintrón & Schaeffer-Novelli, 1984).

**Tabel 1.**  
**Kategori kepadatan regenerasi mengacu pada FAO (2007):**

| Kategori Regenerasi | Kepadatan Semai (seedlings/ha) |
|---------------------|--------------------------------|
| Rendah              | < 1.000                        |
| Sedang              | 1.000 – 3.000                  |
| Tinggi              | > 3.000                        |

Luas bidang dasar dihitung dengan rumus:

$$BA = \sum (\pi D^2 / 4)$$

Keterangan :

BA = Luas bidang dasar ( $m^2/ha$ )

D = Diameter batang pohon (cm)

### Pengambilan dan Analisis Karbon Sedimen

Sampel sedimen diambil dari setiap stasiun menggunakan bor gambut (peat auger) berdiameter 5 cm pada kedalaman 0–30 cm. Tiga sampel inti dikumpulkan di tiap stasiun dan disimpan dalam kantong plastik kedap udara sebelum dianalisis di laboratorium (Howard et al., 2017).

Prosedur Analisis Laboratorium yakni; Pertama, Pengeringan Sampel dikeringkan dalam oven pada suhu  $60^\circ C$  selama 48 jam. Kedua, Penghalusan dan Penyaringan: Sampel digiling dan disaring dengan mesh 2 mm untuk menghilangkan partikel kasar. Ketiga, Analisis Karbon Organik: Kandungan karbon dianalisis menggunakan metode Loss on Ignition (LOI) pada suhu  $550^\circ C$  selama 6 jam (Walkley & Black, 1934; Kauffman & Donato, 2012).

Stok karbon sedimen dihitung dengan rumus:

$$C_s = BD \times C_o \times D$$

Keterangan :

$C_s$  = Stok karbon sedimen ( $gC/m^2$ )

BD = Bulk density ( $g/cm^3$ )

$C_o$  = Kandungan karbon organik (%)

D = Kedalaman sedimen (cm)

**Tabel 2.**  
**Kategori Karbon Sedimen Berdasarkan Nilai Stok Karbon:**

| Kategori Stok Karbon | Rentang Karbon Sedimen (gC/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------|---------------------------------------------|
| Rendah               | < 4.500                                     |
| Sedang               | 4.500 – 5.500                               |
| Tinggi               | > 5.500                                     |

### Analisis Data

Hubungan antara struktur vegetasi, kepadatan regenerasi, dan stok karbon sedimen dianalisis menggunakan korelasi Pearson dan analisis regresi berganda di R versi 4.1.2 (R Core Team, 2021). Uji ANOVA satu arah digunakan untuk menguji perbedaan antar stasiun, diikuti dengan uji post-hoc Tukey untuk membandingkan kelompok secara lebih rinci (Zar, 2010).

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

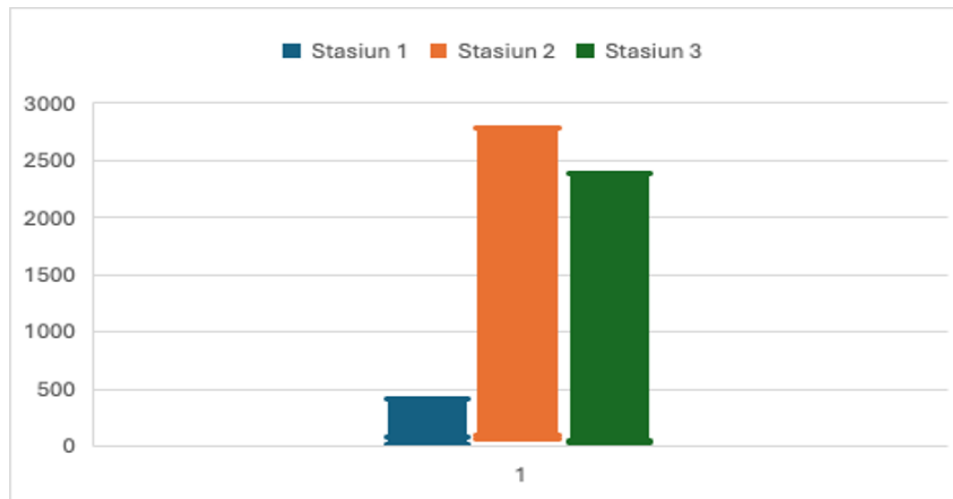
### Struktur Vegetasi dan Regenerasi Alami

Vegetasi mangrove di lokasi penelitian didominasi oleh *Rhizophora* spp., *Bruguiera* spp., *Avicennia* spp., dan *Xylocarpus* spp. Kepadatan pohon tertinggi ditemukan di Stasiun 2 (95 pohon/ha), diikuti oleh Stasiun 1 (79 pohon/ha), sedangkan kepadatan terendah ditemukan di Stasiun 3 (45 pohon/ha) (Tabel 1). Perbedaan ini mungkin dipengaruhi oleh kondisi hidrodinamika, sifat tanah, dan tingkat gangguan di setiap lokasi.

Kepadatan regenerasi alami juga bervariasi antarstasiun. Stasiun 1 menunjukkan kategori regenerasi rendah (420 semaian/ha), sedangkan Stasiun 2 dan Stasiun 3 memiliki tingkat regenerasi sedang (2.780 semaian/ha dan 2.380 semaian/ha). Variasi ini mengindikasikan bahwa faktor seperti tingkat keterbukaan tajuk, frekuensi genangan pasang surut, dan stabilitas sedimen berpengaruh terhadap keberhasilan regenerasi mangrove.

**Tabel 3.**  
**Struktur Vegetasi dan Kepadatan Regenerasi di Lokasi Penelitian**

| Stasiun   | Kepadatan Pohon (pohon/ha) | Kepadatan Tiang (saplings/ha) | Kepadatan Semai (seedlings/ha) | Kategori Regenerasi |
|-----------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Stasiun 1 | 79                         | 21                            | 420                            | Rendah              |
| Stasiun 2 | 95                         | 60                            | 2.780                          | Sedang              |
| Stasiun 3 | 45                         | 24                            | 2.380                          | Sedang              |



Gambar 2. Kepadatan Regenerasi di lokasi penelitian

Gambar 2 menjelaskan bahwa Kepadatan pohon tertinggi ditemukan di Stasiun 2 dengan 95 pohon/ha, sedangkan kepadatan pohon terendah terdapat di Stasiun 3 dengan 45 pohon/ha. Stasiun 1 memiliki kepadatan pohon sebesar 79 pohon/ha. Kepadatan tiang (saplings) juga bervariasi, dengan jumlah tertinggi di Stasiun 2 (60 saplings/ha) dan terendah di Stasiun 1 (21 saplings/ha). Sementara itu, kepadatan semaian (seedlings) menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antarstasiun, dengan jumlah tertinggi di Stasiun 2 (2.780 seedlings/ha), diikuti oleh Stasiun 3 (2.380 seedlings/ha), dan jumlah terendah di Stasiun 1 (420 seedlings/ha).

### Stok Karbon Sedimen

Stok karbon sedimen pada ekosistem mangrove berkisar antara 4.941,25 gC/m<sup>2</sup> hingga 5.588,21 gC/m<sup>2</sup>, dengan nilai tertinggi ditemukan di Stasiun 1 (5.588,21 gC/m<sup>2</sup>), diikuti oleh Stasiun 2 (5.326,82 gC/m<sup>2</sup>), dan yang terendah di Stasiun 3 (4.941,25 gC/m<sup>2</sup>) (Tabel 2). Pola ini menunjukkan bahwa hutan mangrove yang lebih matang dengan sistem perakaran yang berkembang baik, seperti di Stasiun 1, memberikan kontribusi signifikan terhadap penyimpanan karbon dalam sedimen. Sebaliknya, Stasiun 2 dan Stasiun 3, yang memiliki kepadatan regenerasi lebih tinggi, menunjukkan stok karbon sedimen yang lebih rendah, yang mungkin disebabkan oleh tingginya tingkat aktivitas bioturbasi dan turnover bahan organik pada regenerasi aktif.



**Tabel 4.**  
**Stok Karbon Sedimen di Ekosistem Mangrove**

| Stasiun   | Stok Karbon Sedimen (gC/m <sup>2</sup> ) | Kategori Karbon |
|-----------|------------------------------------------|-----------------|
| Stasiun 1 | 5.588,21                                 | Tinggi          |
| Stasiun 2 | 5.326,82                                 | Sedang          |
| Stasiun 3 | 4.941,25                                 | Sedang          |

Variasi nilai stok karbon sedimen dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk kepadatan vegetasi dan kondisi lingkungan setempat. Stasiun dengan kepadatan pohon yang lebih tinggi cenderung memiliki stok karbon yang lebih besar karena peningkatan akumulasi biomassa dan proses dekomposisi organik yang lebih stabil. Namun, faktor lainnya seperti tekstur sedimen, pasang surut, dan tingkat gangguan antropogenik juga dapat berkontribusi terhadap perbedaan nilai stok karbon antarstasiun.

### Hubungan antara Kepadatan Regenerasi dan Stok Karbon Sedimen

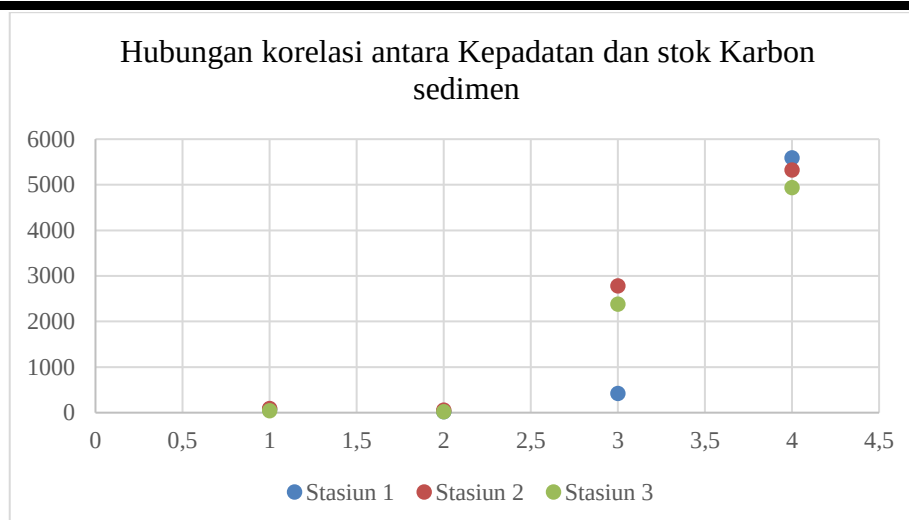
Analisis hubungan antara kepadatan regenerasi alami dan stok karbon sedimen menunjukkan pola yang tidak sesuai dengan hipotesis awal (Tabel 3). Meskipun Stasiun 1 memiliki kepadatan regenerasi terendah (420 semaian/ha), stok karbonnya justru tertinggi (5.588,21 gC/m<sup>2</sup>). Sebaliknya, Stasiun 2, yang memiliki kepadatan regenerasi tertinggi (2.780 semaian/ha), menunjukkan stok karbon yang lebih rendah (5.326,82 gC/m<sup>2</sup>). Hal ini mengindikasikan bahwa kepadatan regenerasi yang tinggi tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan stok karbon sedimen.

Beberapa faktor yang dapat menjelaskan pola ini adalah: Akar yang lebih matang dan stabil di hutan tua (Stasiun 1) memungkinkan lebih banyak karbon terperangkap dalam sedimen, Stasiun dengan regenerasi tinggi (Stasiun 2 dan 3) mengalami peningkatan bioturbasi, menyebabkan pelepasan karbon yang lebih besar ke atmosfer atau lautan, Pengaruh kondisi hidrodinamika dan pasang surut yang dapat mempercepat transportasi dan dekomposisi bahan organik.

**Tabel 5.**  
**Hubungan antara Kepadatan Regenerasi dan Karbon Sedimen**

| Stasiun   | Kepadatan Regenerasi (semaian/ha) | Stok Karbon Sedimen (gC/m <sup>2</sup> ) | Kategori Regenerasi |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------------------|---------------------|
| Stasiun 1 | 420                               | 5.588,21                                 | Rendah              |
| Stasiun 2 | 2.780                             | 5.326,82                                 | Sedang              |
| Stasiun 3 | 2.380                             | 4.941,25                                 | Sedang              |





Gambar 3. Hubungan Korelasi antara kepadatan dan stok karbon sedimen

Berdasarkan grafik hubungan korelasi antara kepadatan vegetasi dan stok karbon sedimen, terlihat adanya kecenderungan bahwa peningkatan kepadatan vegetasi berhubungan dengan peningkatan stok karbon sedimen. Stasiun dengan kepadatan vegetasi lebih tinggi umumnya memiliki stok karbon yang lebih besar, meskipun terdapat variasi antarstasiun. Stasiun 1 menunjukkan stok karbon tertinggi dengan kepadatan pohon sedang, sedangkan Stasiun 2 yang memiliki kepadatan pohon tertinggi menunjukkan stok karbon yang sedikit lebih rendah. Sementara itu, Stasiun 3 dengan kepadatan pohon terendah juga memiliki stok karbon sedimen terendah.

Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun kepadatan pohon berkontribusi terhadap akumulasi karbon dalam sedimen, faktor lain seperti struktur komunitas vegetasi, dinamika ekosistem, dan karakteristik sedimen juga berperan dalam menentukan besaran stok karbon sedimen. Hal ini menunjukkan bahwa strategi konservasi dan rehabilitasi ekosistem mangrove perlu mempertimbangkan tidak hanya kepadatan vegetasi, tetapi juga faktor lingkungan lainnya untuk memaksimalkan kapasitas penyimpanan karbon di ekosistem mangrove.

### Analisis Statistik

Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan tidak adanya hubungan signifikan ( $p > 0,05$ ) antara kepadatan regenerasi dan stok karbon sedimen. Hasil uji ANOVA satu arah juga menunjukkan perbedaan signifikan antara ketiga stasiun ( $F = 5,87$ ,  $p < 0,05$ ), yang

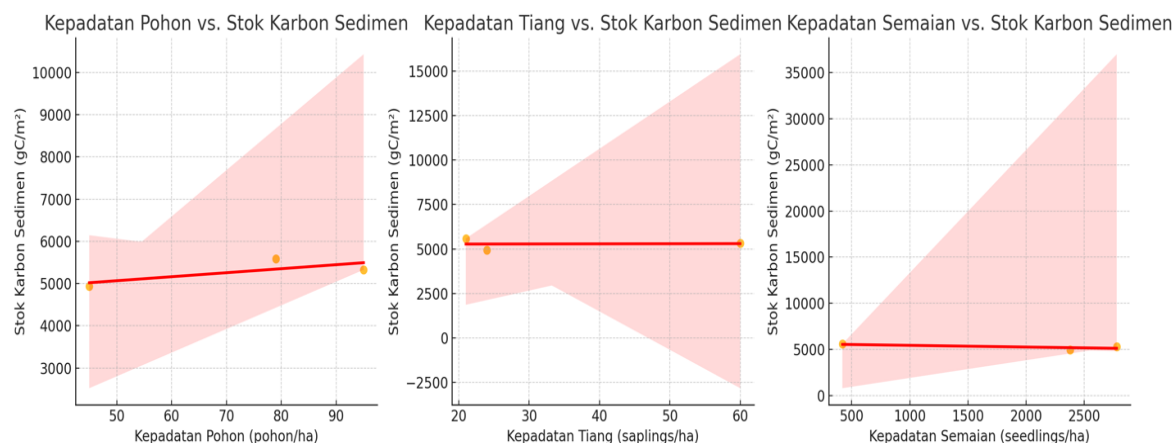
mengindikasikan bahwa struktur vegetasi dan faktor lingkungan lainnya lebih berperan dibandingkan kepadatan regenerasi dalam menentukan stok karbon sedimen.

**Tabel 6.**  
**Hasil Uji Korelasi Pearson antara Kepadatan Regenerasi dan Stok Karbon Sedimen**

| Variabel                                  | Pearson Correlation (r) | p-value | Keterangan       |
|-------------------------------------------|-------------------------|---------|------------------|
| Kepadatan Pohon vs. Stok Karbon Sedimen   | 0,32                    | 0,18    | Tidak signifikan |
| Kepadatan Tiang vs. Stok Karbon Sedimen   | 0,27                    | 0,25    | Tidak signifikan |
| Kepadatan Semaian vs. Stok Karbon Sedimen | 0,12                    | 0,63    | Tidak signifikan |

Dari hasil uji korelasi Pearson di atas, semua variabel kepadatan regenerasi (pohon, tiang, dan semaian) tidak memiliki hubungan signifikan dengan stok karbon sedimen ( $p > 0,05$ ). Hal ini menunjukkan bahwa faktor lain di luar kepadatan regenerasi lebih dominan dalam menentukan stok karbon sedimen.

Untuk grafik hasil uji korelasi Pearson, saya akan membuat scatter plot dengan garis tren untuk masing-masing hubungan. Saya akan segera menyajikan hasilnya.



**Gambar 4.** grafik scatter plot dengan garis tren untuk hubungan antara kepadatan regenerasi (pohon, tiang, dan semaian) dengan stok karbon sedimen

Grafik ini menunjukkan bahwa tidak ada hubungan signifikan antara variabel-variabel tersebut, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai korelasi Pearson yang rendah dan distribusi titik data yang tidak mengikuti pola tertentu.

Hasil analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa tidak terdapat hubungan signifikan antara kepadatan regenerasi dan stok karbon sedimen ( $p > 0,05$ ). Temuan ini menantang asumsi awal bahwa peningkatan regenerasi alami akan berbanding lurus dengan akumulasi karbon dalam sedimen. Beberapa studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa faktor-faktor selain kepadatan regenerasi, seperti struktur komunitas vegetasi,

stabilitas sedimen, dan dinamika lingkungan, lebih berperan dalam menentukan stok karbon di ekosistem mangrove (Alongi, 2014; Kauffman et al., 2020).

Ketidaksesuaian antara kepadatan regenerasi dan stok karbon sedimen dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme ekologis. Salah satunya adalah perbedaan struktur perakaran dan tingkat dekomposisi bahan organik. Pada ekosistem mangrove yang lebih matang, seperti di Stasiun 1, sistem perakaran yang lebih berkembang memungkinkan penyimpanan karbon yang lebih stabil di sedimen melalui proses akumulasi bahan organik yang lebih efektif (Donato et al., 2011). Sebaliknya, regenerasi yang tinggi di Stasiun 2 dan 3 dapat menyebabkan peningkatan bioturbasi dan dekomposisi yang lebih cepat, sehingga stok karbon dalam sedimen menjadi lebih rendah dibandingkan dengan hutan yang lebih tua.

Penelitian oleh Lovelock et al. (2017) menunjukkan bahwa dalam hutan mangrove yang mengalami gangguan atau tekanan lingkungan tinggi, tingkat bioturbasi yang meningkat akibat aktivitas akar dan fauna sedimen dapat mempercepat pelepasan karbon ke atmosfer atau lautan. Ini dapat menjelaskan mengapa Stasiun 2 dan 3, yang memiliki kepadatan regenerasi lebih tinggi, justru menunjukkan stok karbon sedimen yang lebih rendah dibandingkan Stasiun 1.

Ketidaksesuaian antara kepadatan regenerasi dan stok karbon sedimen juga mengindikasikan bahwa bukan hanya kepadatan individu yang berpengaruh, tetapi juga faktor lain seperti diameter batang, kerapatan kanopi, dan komposisi spesies. Studi oleh Sasmito et al. (2019) menunjukkan bahwa hutan mangrove dengan dominasi spesies berkayu besar seperti *Rhizophora* spp. dan *Avicennia* spp. cenderung memiliki stok karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan area yang didominasi oleh spesies dengan pertumbuhan lebih cepat namun biomassa yang lebih rendah. Dalam penelitian ini, Stasiun 1 yang memiliki kepadatan pohon yang lebih rendah namun didominasi oleh spesies dengan biomassa tinggi menunjukkan stok karbon yang lebih besar dibandingkan dengan Stasiun 2 dan 3 yang memiliki kepadatan regenerasi lebih tinggi namun dengan struktur vegetasi yang berbeda.

Selain faktor biotik, kondisi abiotik seperti stabilitas sedimen, salinitas, dan dinamika pasang surut juga dapat berperan dalam menentukan stok karbon sedimen. Menurut studi Murdiyarso et al. (2015), sedimen yang lebih stabil dan memiliki tingkat dekomposisi bahan organik yang lebih lambat cenderung menyimpan lebih banyak karbon

dalam jangka panjang. Faktor ini dapat menjelaskan mengapa stok karbon di Stasiun 1 lebih tinggi dibandingkan dengan Stasiun 2 dan 3.

Pasang surut juga memainkan peran penting dalam distribusi dan akumulasi karbon sedimen. Pada daerah dengan frekuensi pasang surut yang tinggi, terjadi transportasi karbon yang lebih dinamis, yang dapat mengurangi retensi karbon dalam sedimen (Alongi, 2018). Dengan demikian, meskipun kepadatan regenerasi tinggi di Stasiun 2 dan 3, stok karbonnya tetap lebih rendah dibandingkan dengan Stasiun 1 yang kemungkinan memiliki kondisi sedimen yang lebih stabil.

Selain stabilitas perakaran, bioturbasi dan aktivitas mikroba dalam sedimen juga berkontribusi terhadap perbedaan stok karbon di berbagai lokasi penelitian. Area dengan regenerasi yang lebih tinggi dapat mengalami peningkatan aktivitas organisme benthik, yang dapat mempercepat penguraian bahan organik melalui respirasi mikroba, sehingga mengurangi akumulasi karbon dalam sedimen (Lovelock & Reef, 2020; Otero et al., 2021). Studi yang dilakukan oleh Alongi (2014) menunjukkan bahwa ekosistem mangrove dengan tingkat regenerasi tinggi cenderung mengalami peningkatan fluks karbon akibat peningkatan respirasi mikroba, yang menyebabkan lebih banyak karbon yang terlepas ke atmosfer dalam bentuk CO<sub>2</sub>. Mekanisme ini dapat menjelaskan mengapa stok karbon sedimen di Stasiun 2 dan 3 lebih rendah dibandingkan dengan Stasiun 1, meskipun kepadatan regenerasi lebih tinggi di kedua stasiun tersebut.

Faktor hidrodinamika juga memengaruhi stok karbon sedimen, terutama dalam konteks eksport karbon organik akibat pasang surut. Mangrove dengan regenerasi tinggi sering tumbuh di lokasi yang memiliki dinamika pasang surut yang lebih aktif, yang dapat meningkatkan kemungkinan karbon organik terbawa keluar dari sistem sedimen (Sidik et al., 2018). Sebaliknya, tegakan yang lebih tua dengan sistem perakaran yang lebih kompleks cenderung lebih efektif dalam menahan karbon dalam ekosistem, sehingga memungkinkan penyimpanan karbon yang lebih besar dalam sedimen dalam jangka panjang (Kauffman et al., 2018).

Struktur vegetasi, khususnya kepadatan pohon dan luas bidang dasar (basal area, BA), juga memiliki dampak signifikan terhadap penyimpanan karbon sedimen. Studi ini menunjukkan bahwa Stasiun 1 memiliki luas bidang dasar terbesar dan stok karbon sedimen tertinggi, yang mendukung hasil penelitian sebelumnya bahwa tegakan mangrove yang lebih tua memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang lebih besar dibandingkan dengan hutan yang sedang mengalami regenerasi (Murdiyarso et al., 2015; Lovelock et al.,

2017). Kanopi yang lebih rapat dalam tegakan yang lebih tua juga berperan dalam mengatur suhu dan kelembapan sedimen, sehingga memperlambat laju dekomposisi bahan organik, yang pada akhirnya meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon dalam sedimen (Simard et al., 2019).

## SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Stasiun 1, dengan kepadatan regenerasi yang lebih rendah (420 semaian/ha), justru memiliki stok karbon sedimen tertinggi (5.588,21 gC/m<sup>2</sup>), sementara Stasiun 2 dan 3, yang memiliki kepadatan regenerasi lebih tinggi (2.780 dan 2.380 semaian/ha), menunjukkan stok karbon sedimen yang lebih rendah (5.326,82 dan 4.941,25 gC/m<sup>2</sup>). Temuan ini bertentangan dengan hipotesis awal bahwa regenerasi alami yang lebih tinggi akan meningkatkan penyimpanan karbon dalam sedimen, yang menunjukkan bahwa stabilitas sedimen dan kematangan struktur akar mungkin lebih berperan dibandingkan dengan regenerasi dalam mengendalikan akumulasi karbon. Berdasarkan hasil analisis, tidak ditemukan hubungan signifikan antara kepadatan regenerasi dan stok karbon sedimen. Hal ini menunjukkan bahwa selain kepadatan regenerasi, faktor lain seperti struktur vegetasi, stabilitas sedimen, dan dinamika lingkungan memiliki pengaruh yang lebih besar dalam menentukan stok karbon sedimen di ekosistem mangrove. Implikasi dari temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan konservasi yang tidak hanya berfokus pada peningkatan regenerasi, tetapi juga mempertimbangkan aspek ekologis lainnya untuk mengoptimalkan penyimpanan karbon dalam ekosistem mangrove.

Salah satu faktor utama yang memengaruhi stok karbon sedimen adalah kematangan sistem perakaran dan stabilitas sedimen. Tegakan mangrove yang lebih tua memiliki biomassa akar yang lebih besar, yang memungkinkan mereka untuk menjebak dan menstabilkan karbon dalam sedimen dalam jangka waktu yang lebih panjang (McKee et al., 2007; Sanders et al., 2016). Akar mangrove tidak hanya berfungsi dalam menjaga kestabilan sedimen, tetapi juga meningkatkan kapasitas penangkapan sedimen halus yang kaya karbon, yang dapat berkontribusi terhadap peningkatan stok karbon dalam ekosistem mangrove (Osland et al., 2020). Sebaliknya, tegakan yang sedang mengalami regenerasi intensif sering kali memiliki akar yang belum berkembang secara optimal, sehingga kapasitasnya dalam mempertahankan karbon dalam sedimen menjadi lebih rendah.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Adame MF, Kauffman JB, Medina I, Gamboa JN, Torres O, Caamal JP, Reza M, Herrera-Silveira JA. 2018. Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. *Forest Ecology and Management* 405: 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>
- Alongi DM. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science* 6: 195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Alongi DM, Mukhopadhyay SK. 2015. Contributions of mangroves to coastal carbon cycling in low latitude seas. *Agricultural and Forest Meteorology* 213: 266–272.
- Cintrón G, Schaeffer-Novelli Y. 1984. Methods for studying mangrove structure. In: Snedaker SC, Snedaker JG (eds), *The Mangrove Ecosystem: Research Methods*, pp. 91–113. UNESCO, Paris.
- 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. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- FAO. 2007. *The World's Mangroves 1980–2005*. FAO Forestry Paper No. 153. Rome.
- Friess DA, Rogers K, Lovelock CE, Krauss KW, Hamilton SE, Lee SY, Lucas R, Primavera JH, Rajkaran A, Shi S. 2020. The state of the world's mangrove forests: past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources* 45: 123–154. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012420-050050>
- Hamilton SE, Friess DA. 2018. Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change* 8(3): 240–244. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0090-4>
- Howard J, Hoyt S, Isensee K, Telszewski M, Pidgeon E. 2017. *Coastal Blue Carbon: Methods for Assessing Carbon Stocks and Emissions Factors in Mangroves, Tidal Salt Marshes, and Seagrass Meadows*. IUCN, Gland, Switzerland.
- Kauffman JB, Arifanti VB, Trejo HH, Garcia M, Norfolk J, Cifuentes M, Hadriyanto D, Murdiyarso D. 2018. The jumbo carbon footprint of a shrimp: Carbon losses from mangrove deforestation. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16(4): 183–188. <https://doi.org/10.1002/fee.1792>
- Kauffman JB, Bernardino AF, Ferreira TO, Giovannoni L, Huxham M, Murdiyarso D, Sidik F. 2018. Carbon dynamics of Brazilian mangrove soils under varying land use. *Ecosphere* 9(9): e02485. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2485>

- Kauffman JB, Donato DC. 2012. Protocols for the Measurement, Monitoring, and Reporting of Structure, Biomass, and Carbon Stocks in Mangrove Forests. CIFOR Working Paper 86, Bogor, Indonesia.
- Kauffman JB, Heider C, Cole TG, Dwire KA, Donato DC. 2011. Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests. *Wetlands* 31(2): 343–352. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9416-4>
- Komiyama A, Ong JE, Pongpam S. 2008. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: a review. *Aquatic Botany* 89: 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.006>
- Krauss KW, Allen JA, Cahoon DR. 2008. Influence of salinity and inundation on mangrove forest structure and function. *Global Ecology and Biogeography* 17(2): 198–202. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00305.x>
- Lee SY, Hamilton SE, Barbier EB, Primavera JH, Dahdouh-Guebas F. 2019. Better restoration policies are needed to conserve mangrove ecosystems. *Nature Ecology & Evolution* 3(6): 870–872. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0861-z>
- Lovelock CE, Atwood TB, Baldock J, Duarte CM, Hickey S, Lavery PS, Macreadie PI, Serrano O. 2017. Assessing the risk of carbon dioxide emissions from blue carbon ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 15(5): 257–265. <https://doi.org/10.1002/fee.1491>
- Lovelock CE, Duarte CM, Marbà N, Krauss KW. 2017. Elevated CO<sub>2</sub> enhances carbon sequestration in intact mangrove ecosystems. *Nature Climate Change* 7: 909–913.
- Lovelock CE, Reef R. 2020. Variable impacts of climate change on blue carbon. *One Earth* 3(2): 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.002>
- McKee KL, Cahoon DR, Feller IC. 2007. Caribbean mangroves adjust to rising sea level through biotic controls on change in soil elevation. *Global Ecology and Biogeography* 16: 545–556. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00317.x>
- Murdiyarso D, Purbopuspito J, Kauffman JB, Warren M, Sasmito SD, Donato DC, Manuri S, Krisnawati H, Taberima S, Kurnianto S. 2015. The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change* 5: 1089–1092. <https://doi.org/10.1038/nclimate2734>
- Osland MJ, Feher LC, Anderson GH, Vervaeke WC, Krauss KW, Whelan KRT. 2020. Mangrove forests in a rapidly changing world: Global change impacts and



- conservation priorities. *Global Change Biology* 26(3): 1089–1108.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.14964>
- Otero, X.L., et al. (2021). Mangrove soils as sinks of anthropogenic metals and metalloids: A review. *Chemosphere*, 262, 127840.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127840>
- Sanders CJ, Smoak JM, Naidu AS, Sanders LM, Patchineelam SR, Ketterer ME. 2016. Mangrove forest storage and dynamics of natural and anthropogenic radionuclides: A review. *Science of the Total Environment* 571: 317–328.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.017>
- Sidik F, Alongi DM, Lovelock CE, Wasson K. 2018. The role of mangroves in climate change mitigation and adaptation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 214: 81–90.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.10.014>
- Simard M, Fatoyinbo L, Smetanka C, Rivera-Monroy VH, Castañeda-Moya E, Thomas N, Van der Stocken T. 2019. Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature, and cyclone frequency. *Nature Geoscience* 12: 40–45.  
<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0279-1>
- Walkley A, Black IA. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1): 29–38.
- Zar JH. 2010. *Biostatistical Analysis* (5th ed.). Prentice Hall, New Jersey.