

Distribusi Spasial dan Komposisi Sampah Laut pada Ekosistem Mangrove Kepulauan Karimunjawa

Muammar Ridho Assidqy*, Sigit Febrianto, Churun Ain

Departemen Sumberdaya Akuatik, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang Jawa Tengah, 50275 Indonesia
Email: muammaridhoo@gmail.com

Abstrak

Ekosistem mangrove memiliki peran strategis dalam menjaga stabilitas wilayah pesisir, baik dari aspek ekologis, ekonomis, maupun sosial. Meningkatnya aktivitas antropogenik seperti permukiman, pariwisata, dan perikanan menyebabkan akumulasi sampah laut yang mengancam keberlanjutan ekosistem mangrove. Kepulauan Karimunjawa sebagai kawasan konservasi mengalami tekanan akibat polusi sampah laut yang terperangkap di sistem perakaran mangrove. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis dan komposisi sampah laut, menghitung kepadatan, serta memetakan distribusi spasialnya pada ekosistem mangrove. Penelitian dilakukan pada dua lokasi dengan karakteristik yang berbeda, menggunakan metode line transect berdasarkan zonasi pertumbuhan mangrove (seaward, middle, dan landward). Pengolahan data mencakup uji independent samples t-test, regresi polinomial, serta analisis spasial menggunakan citra satelit Sentinel-2A. Hasil Penelitian menunjukkan sampah plastik merupakan jenis dominan (65,86%), diikuti oleh styrofoam (20%) dan karet (9,81%). Lokasi mangrove dekat permukiman memiliki kepadatan sampah yang signifikan lebih tinggi dibandingkan kawasan wisata ($p < 0,05$). Sampah laut terkonsentrasi pada zona seaward (92,88%) dan menunjukkan hubungan kuat dengan jarak pengambilan sampel dari pantai ($R^2 = 0,83$). Vegetasi mangrove yang ditemukan di lokasi penelitian terdiri atas *Rhizophora sp.*, *Sonneratia sp.*, *Ceriops sp.*, dan *Lumnitzera sp.* yang memiliki karakteristik perakaran berbeda dan berperan dalam proses penjebakan sampah. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam penyusunan strategi mitigasi berbasis spasial untuk perlindungan ekosistem mangrove dari tekanan limbah padat.

Kata kunci : Distribusi Spasial, Ekosistem Mangrove, Kepulauan Karimunjawa, Sampah Laut.

Abstract

Spatial Distribution and Composition of Marine Debris in the Mangrove Ecosystems of Karimunjawa Islands

Mangrove ecosystems play a strategic role in maintaining coastal stability from ecological, economic, and social perspectives. Increasing of anthropogenic activities such as settlement, tourism, and fisheries have led to the accumulation of marine debris that threatens the sustainability of mangrove ecosystems. The Karimunjawa Islands, designated as a marine conservation area, have also been affected by marine debris pollution, which becomes trapped in the root systems of mangrove vegetation. This study aims to identify the types and composition of marine debris, calculate its density, and map its spatial distribution within the mangrove ecosystem. Study were conducted at two locations, using the line transect method across mangrove zonations (seaward, middle, and landward). Data analysis included independent samples t-test, polynomial regression, and spatial analysis using Sentinel-2A satellite imagery. Results showed that plastic was the dominant type of debris (65.86%), followed by styrofoam (20%) and rubber (9.81%). Mangrove areas near settlements exhibited significantly higher debris density compared to tourism zones ($p < 0.05$). The highest concentration of marine debris was found in the seaward zone (92.88%) and showed a strong relationship with sampling distance from the shoreline ($R^2 = 0.83$). Mangrove species identified in the study area included *Rhizophora sp.*, *Sonneratia sp.*, *Ceriops sp.*, and *Lumnitzera sp.*, each possessing distinct root structures that contribute to debris trapping. This study contributes to the development of spatially based mitigation strategies for protecting mangrove ecosystems from solid waste pollution.

Keywords : Mangrove ecosystem, Marine debris, Karimunjawa Islands, Spatial Distribution.

*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v14i3.72787

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 29-04-2025

Disetujui/Accepted : 17-06-2025

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki ekosistem mangrove terluas di dunia dengan luas sekitar 3.364.080 ha (Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2021). Distribusi ekosistem mangrove di Indonesia sangat luas, hampir seluruh provinsi terdapat ekosistem mangrove. Mangrove merupakan salah satu ekosistem vital karena memiliki produktivitas yang tinggi dalam proses dekomposisi organik sekaligus ekosistem yang menjaga proses siklus penyimpanan karbon. Bagi biota ekosistem mangrove bermanfaat sebagai *nursery ground*, *feeding ground*, *spawning ground*, serta mencegah terjadinya abrasi akibat gelombang laut, intrusi air laut, dan mengendalikan perubahan iklim (Sambu *et al.*, 2018).

Salah satu kawasan mangrove di Pulau Jawa yang masih alami berada di wilayah Kepulauan Karimunjawa. Akan tetapi kondisi mangrove di Karimunjawa saat ini juga mengalami berbagai tekanan, seperti adanya konversi wilayah mangrove menjadi tambak udang dan sampah laut yang mencemari kawasan pesisir Karimunjawa. Ekosistem mangrove terus mengalami ancaman yang signifikan seperti perubahan hidrologi, konversi lahan menjadi tambak akuakultur, serta polusi dari sampah laut antropogenik (Yuniarti *et al.*, 2023). Adanya aktivitas antropogenik menjadi alasan utama terjadinya deforestasi mangrove (Elfayetti *et al.*, 2024). Akibatnya banyak organisme yang kehilangan habitatnya serta menghilangkan jasa ekosistem sebagai *supporting service*, *regulating service*, *provisioning service*, dan *cultural service* yang disediakan oleh ekosistem mangrove.

Permasalahan sampah laut di Kepulauan Karimunjawa tidak terlepas dari aktivitas antropogenik dan masukan sampah yang terbawa oleh arus dan pasang surut. Sampah - sampah tersebut berasal dari aktivitas laut, limbah aktivitas rumah tangga dan pariwisata yang terbawa menuju kawasan ekosistem mangrove. Sampah yang dihasilkan masuk ke kawasan mangrove dan terperangkap di sistem perakaran mangrove yang harusnya berfungsi sebagai penjebak dan penstabil sedimen. Sampah laut dapat menyebabkan kerusakan dari tekanan terhadap habitat dan kematian langsung spesies hewan, menurunkan produksi primer mangrove, dan menurunkan kualitas air pada lingkungan sekitar (Seeruttun *et al.*, 2021).

Sejauh ini, studi yang secara spesifik memetakan distribusi spasial sampah laut berdasarkan zonasi pertumbuhan mangrove (*seaward*, *middle*, *landward*) di Karimunjawa masih sangat terbatas. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan pendekatan kombinatorik antara survei lapangan, pemetaan spasial berbasis citra satelit Sentinel-2A, dan analisis regresi polinomial untuk menjelaskan hubungan antara jarak dari pantai dengan akumulasi sampah. Hasil studi ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam upaya pengelolaan dan konservasi ekosistem mangrove yang lebih efektif dan berbasis data spasial. Penelitian ini berfokus pada pemetaan distribusi sampah laut, identifikasi komposisi, berat, dan kepadatan sampah pada wilayah ekosistem mangrove di Kepulauan Karimunjawa.

MATERI DAN METODE

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode deskriptif kuantitatif. Metode ini merupakan metode penelitian yang bertujuan menggambarkan dan menyajikan data secara sistematis melalui representasi numerik dan statistik (Sudirman *et al.*, 2023).

Lokasi stasiun pada penelitian ini ditentukan dengan metode purposive sampling. Purposive sampling merupakan metode penentuan titik lokasi stasiun dengan beberapa pertimbangan peneliti sesuai dengan tujuan penelitian (Hidayaturohman *et al.*, 2021). Pemilihan stasiun penelitian (Gambar 1) pada Pulau Kemujan dan Karimunjawa berdasarkan pada pertimbangan sumber masukan sampah laut yang berbeda. Stasiun 1 terletak di ekosistem mangrove sekitar jalur *tracking* mangrove Pulau Kemujan, dipilih untuk mengkaji dampak sampah dari aktivitas pariwisata. Sementara itu, Stasiun 2 berada di kawasan mangrove dekat permukiman penduduk Pulau Karimunjawa, dipilih untuk menganalisis pengaruh sampah domestik dari kegiatan rumah tangga. Penentuan kedua lokasi ini bertujuan membandingkan kontribusi kepadatan sampah laut dari sumber yang berbeda.

Pengumpulan data sampah laut menggunakan metode *line transect*. Metode ini dilakukan dengan menarik garis transek secara *purposive* pada lokasi penelitian. Pengambilan sampah laut mengikuti zonasi pertumbuhan mangrove yaitu *seaward*, *middle*, dan *landward*. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan karakteristik kepadatan sampah di berbagai kondisi lingkungan mangrove. Pemilahan sampah

menggunakan acuan panduan monitoring sampah laut dari UNEP/IOC (2009) di mana terdapat 8 jenis kategori sampah laut yang terdiri dari plastik, *foam* (busa), kain, kaca, metal, kertas, karet, dan kayu.

Pengumpulan data sampah laut dilakukan menggunakan metode *line transect*. Metode ini dilakukan dengan menarik garis transek secara *purposive* pada lokasi penelitian. Pengambilan sampah laut mengikuti zonasi pertumbuhan mangrove yaitu *seaward*, *middle*, dan *landward* (Gambar 2 dan Gambar 3). Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan karakteristik kepadatan sampah di berbagai kondisi lingkungan mangrove. Pemilahan sampah menggunakan acuan panduan monitoring sampah laut dari UNEP/IOC (2009) di mana terdapat 8 jenis kategori sampah laut yang terdiri dari plastik, *foam* (busa), kain, kaca, metal, kertas, karet, dan kayu. Beberapa hal yang perlu diperhatikan sebelum melakukan pengamatan yaitu lokasi pengambilan sampel (stasiun dan transek), area pengambilan sampel harus ditentukan sesuai dengan kondisi sekitar (kerapatan mangrove, kepadatan mangrove, tingkat bahaya lumpur, dan waktu pasang surut)

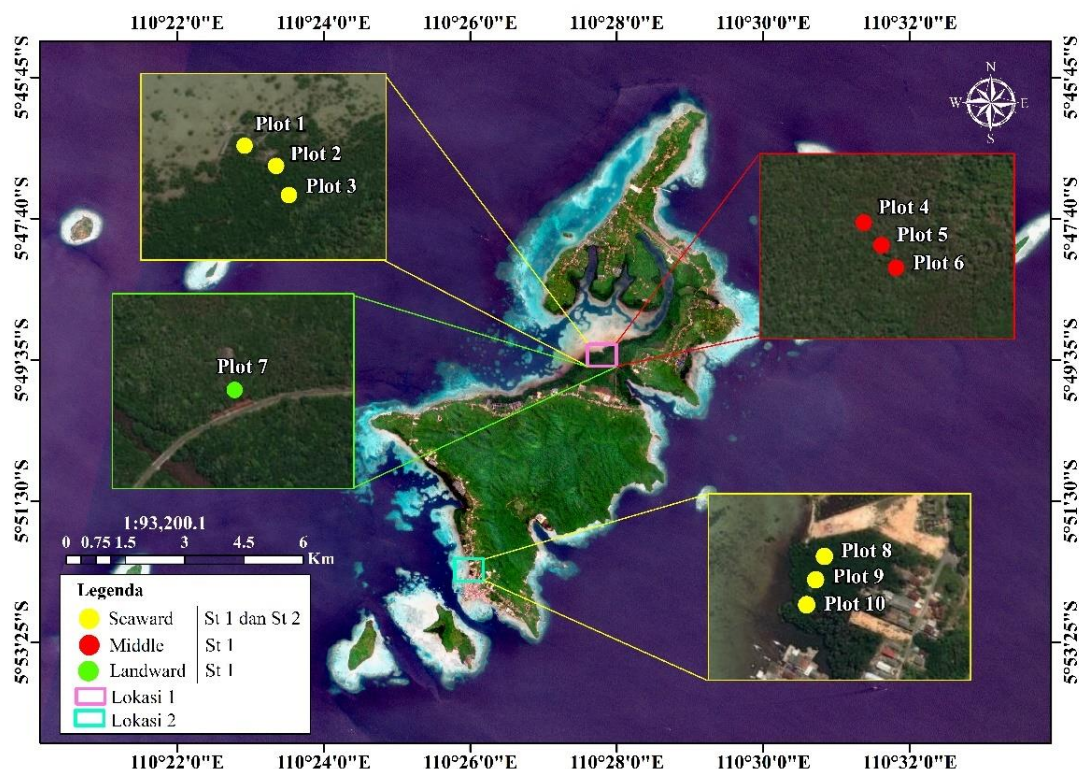
serta alat dan bahan yang diperlukan untuk pengamatan.

Setelah pengambilan data di lapangan, selanjutnya dilakukan analisis dari data sampah laut yang diperoleh. Perhitungan kepadatan dan kepadatan relatif sampah dilakukan untuk setiap zona *seaward*, *middle*, dan *landward* dari dua lokasi penelitian. Analisis yang dilakukan terdiri dari kepadatan, kepadatan relatif, serta komposisi dari setiap jenis sampah yang mengacu dari persamaan oleh Coe dan Rogers (1997) sebagai berikut:

$$\text{Kepadatan jumlah sampah (item)} = \frac{\text{Jumlah sampah setiap kategori (item)}}{\text{Luas area (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Kepadatan berat sampah (kg)} = \frac{\text{Berat sampah setiap kategori (kg)}}{\text{Luas area (m}^2\text{)}}$$

$$\text{Kepadatan relatif jumlah sampah (item)} = \frac{\text{Jumlah sampah setiap kategori (item)}}{\text{Total sampah seluruh kategori (item)}} \times 100\%$$



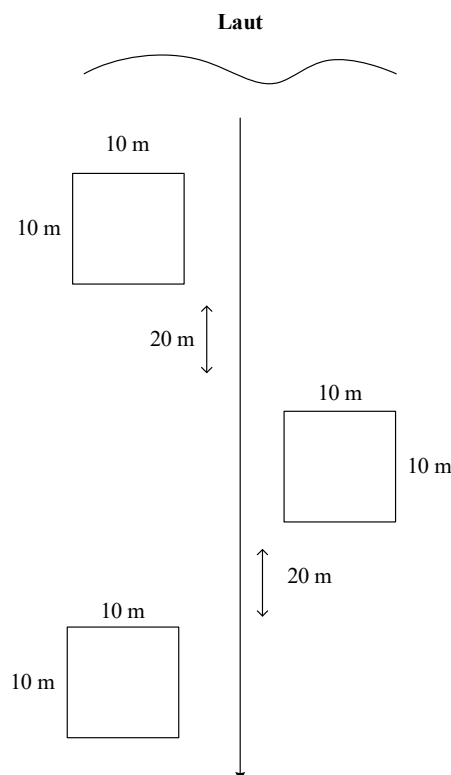
Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Kepadatan relatif berat sampah (kg) = $\frac{\text{Berat sampah setiap kategori (kg)}}{\text{Total sampah seluruh kategori (kg)}} \times 100\%$

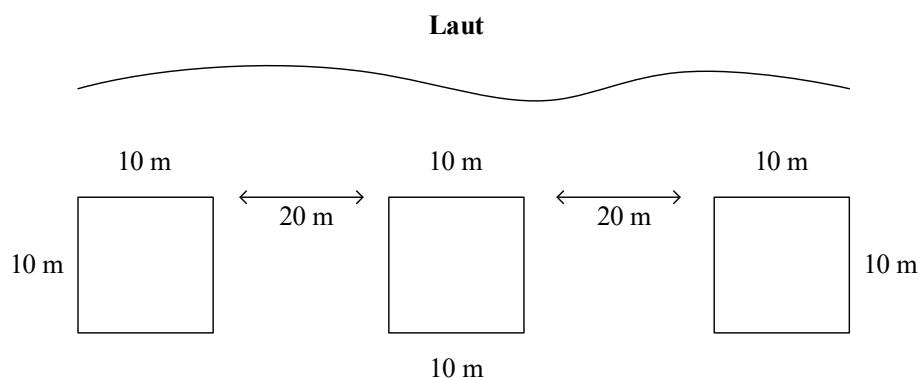
Analisis statistik juga dilakukan pada data kepadatan sampah. Analisis yang dilakukan antara lain *Independent Samples t-Test* untuk menganalisis perbedaan rata-rata kepadatan sampah dari lokasi 1 dan 2. Secara matematis persamaan dari lain *Independent Samples t-Test* adalah sebagai berikut:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Keterangan: t = nilai t hitung; $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ = rata-rata sampel sampah laut lokasi 1 dan lokasi 2; s_1^2, s_2^2 = varians sampel sampah laut lokasi 1 dan lokasi 2; n_1, n_2 = jumlah sampel dari lokasi dari lokasi 1 dan lokasi 2



Gambar 2. Ilustrasi Model *Line Transect* pada Lokasi 1



Gambar 3. Ilustrasi Model *Line Transect* pada Lokasi 2

Analisis regresi polynomial digunakan untuk memberikan gambaran yang lebih akurat terkait hubungan antara jarak pengambilan sampel dan berat sampah. Secara matematis model Regresi Polinomial ditulis dalam persamaan sebagai berikut.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 + \dots + b_n X^n$$

Keterangan: $\hat{Y}$ = Variabel dependen (berat/jumlah sampah laut); X = Variabel independen (jarak); a = Konstanta; b = Koefisien regresi

Interpolasi Inverse Distance Weighted (IDW) digunakan untuk memprediksi distribusi spasial kepadatan sampah laut di lokasi penelitian berdasarkan data titik pengambilan sampel. Metode ini bekerja dengan prinsip pembobotan nilai titik sampel berdasarkan jarak, di mana titik yang lebih dekat memiliki pengaruh lebih besar (Liu *et al.*, 2020). Rumus matematis IDW adalah sebagai berikut:

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i)}{d(x_0, x_i)^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}}$$

Keterangan: $\hat{Z}(x_0)$ = Nilai prediksi pada titik x_0 ; $Z(x_i)$ = Nilai observasi pada titik ke- i ; $d(x_0, x_i)$ = Jarak antara titik x_0 dan titik x_i ; P = Parameter pembobotan (*power value*); n = Jumlah titik sampel yang digunakan untuk interpolasi.

Hasil interpolasi IDW menghasilkan peta kerapatan sampah laut yang menggambarkan variasi spasial akumulasi sampah di ekosistem mangrove. Kelebihan IDW terletak pada kemampuannya memberikan estimasi visual yang intuitif, meskipun memiliki keterbatasan dalam menangani pola distribusi tidak homogen (Li & Heap, 2014).

Peta penggunaan lahan diintegrasikan dengan hasil analisis IDW untuk mengidentifikasi area prioritas mitigasi berdasarkan sebaran sampah dan aktivitas antropogenik dominan. Penggunaan citra satelit dan analisis spasial dalam penelitian ini memungkinkan identifikasi korelasi antara tutupan lahan (permukiman, tambak, hutan mangrove) dengan pola distribusi sampah. Hasil pemetaan penggunaan lahan menggunakan citra satelit Sentinel-2A menjadi dasar untuk mengkaji bagaimana variasi aktivitas manusia di darat berkontribusi terhadap akumulasi sampah laut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sampah yang dikumpulkan terdiri dari berbagai jenis dan dilakukan analisis jenis sampah. Kategori jenis sampah yang digunakan mengacu kepada monitoring sampah laut oleh UNEP/IOC (2009), dimana jenis sampah tersebut terdiri dari plastik, *foam* (busa), kain, kaca, metal, kertas, karet, dan kayu. Sampah laut yang dikumpulkan dari lokasi penelitian dihitung komposisinya pada setiap plot. Komposisi jenis sampah pada ekosistem mangrove di lokasi penelitian disajikan pada Gambar 4.

Berdasarkan hasil yang tersaji pada Gambar 4 dapat diketahui bahwa jenis sampah terbanyak yang ditemukan pada lokasi 1 (plot 1-7) dan lokasi 2 (plot 8-10) di dominasi oleh plastik. Secara persentase dominasi sampah plastik dari seluruh plot penelitian antara lain, Plot 1 sebesar 83,02%, plot 2 sebesar 72%, plot 3 sebesar 89,66%, plot 4 dan 5 sebanyak 100%, plot 6 sebesar 85,71%, plot 7 sebesar 83,33%, Plot 8 sebesar 60,14%, plot 9 sebesar 50,36%, dan plot 10 sebesar 70,79%. Komposisi sampah terbanyak selanjutnya diikuti oleh sampah *foam* (busa) yang umum disebut juga sebagai *styrofoam*, karet, dan jenis sampah lainnya.

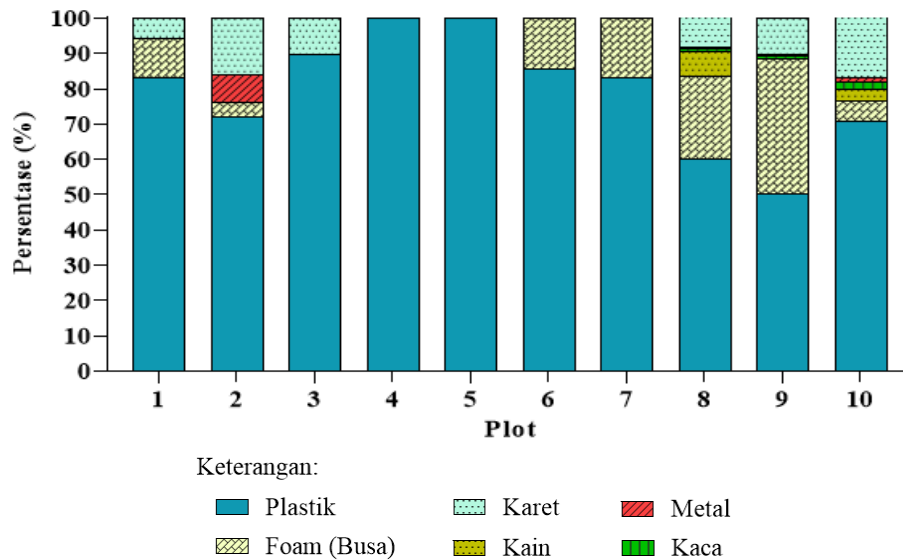
Jenis-jenis sampah laut yang ditemukan pada lokasi penelitian tersaji pada Gambar 5, diperoleh 6 dari 8 jenis sampah laut menurut panduan monitoring sampah laut UNEP/IOC. Jenis sampah yang diperoleh antara lain plastik, *foam* (busa), kain, kaca, metal, dan karet. Sampah yang ditemukan mayoritas sampah berasal dari kegiatan antropogenik, seperti sampah rumah tangga serta aktivitas laut dan perairan.

Berdasarkan hasil sampling yang dilakukan (Gambar 5), diperoleh 6 dari 8 jenis sampah laut menurut panduan monitoring sampah laut UNEP/IOC. Jenis sampah yang diperoleh antara lain plastik, *foam* (busa), kain, kaca, metal, dan karet. Sampah yang ditemukan mayoritas sampah berasal dari kegiatan antropogenik, seperti sampah rumah tangga serta aktivitas laut dan perairan.

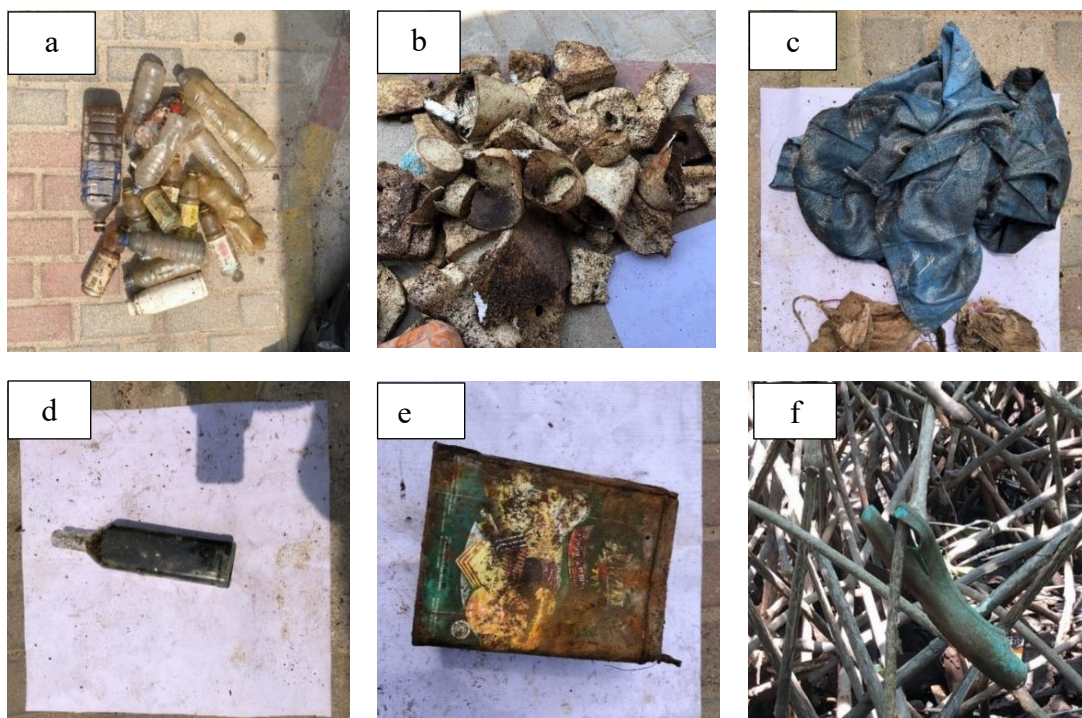
Hasil analisis berat setiap jenis sampah laut (tabel 1) menunjukkan bahwa kepadatan jenis tertinggi yang diperoleh yaitu sampah plastik di kedua lokasi, dengan rata-rata kepadatan $1,15 \pm 1,85$ kg pada lokasi 1 dan $2,62 \pm 4,54$ kg pada lokasi 2. Sampah karet merupakan jenis sampah yang memiliki kepadatan tertinggi setelah sampah plastik dengan kepadatan $0,85 \pm 1,48$ kg pada lokasi 1 dan $1,63 \pm 2,82$ kg di lokasi 2. Jenis sampah pada lokasi 2 yang merupakan ekosistem mangrove di dekat pemukiman jauh lebih beragam jika dibandingkan dengan lokasi 1 yang merupakan

ekosistem mangrove di Pulau Kemujan (kawasan *tracking* mangrove), hal ini diasumsikan bahwa kepadatan jenis sampah yang ada pada lokasi 2 berasal dari berbagai aktivitas rumah tangga. Hal tersebut dapat terlihat dari sampah yang dikumpulkan, dimana sampah yang ditemukan

merupakan sampah-sampah dari bungkus makanan seperti pembungkus makanan berbahan plastik, *foam* (busa)/*styrofoam* yang juga banyak digunakan untuk bungkus makanan, botol minuman berbahan kaca, potongan baju, dan sandal berbahan karet.



Gambar 4. Diagram Komposisi Jenis Sampah Pada Setiap Plot



Gambar 5. Jenis Sampah yang Ditemukan

Keterangan: a. Plastik, b. *Foam* (Busa), c. Kain, d. Kaca, e. Metal, f. Karet

Tabel 1. Kepadatan Setiap Jenis Sampah Setiap Zonasi Menurut Berat (kg)

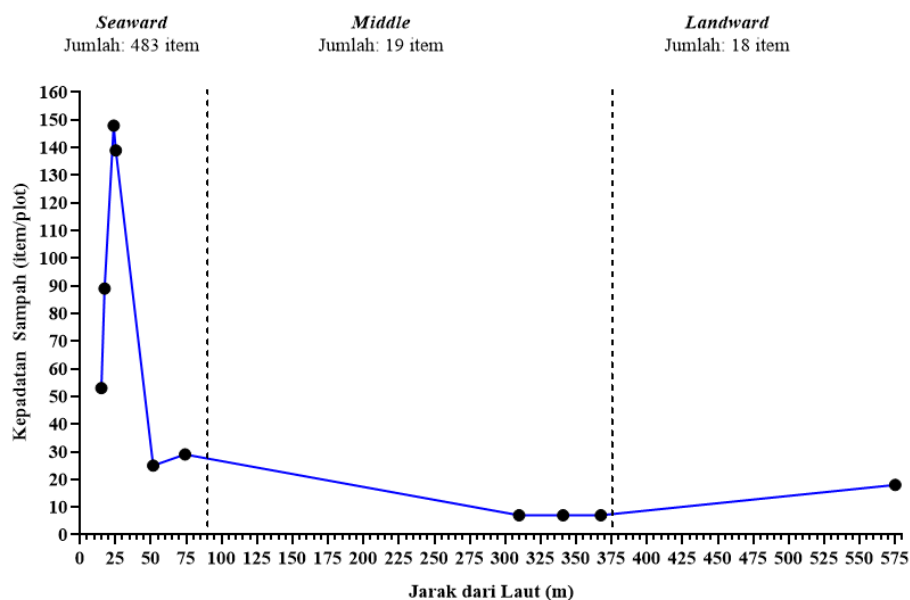
Jenis Sampah	<i>Seaward</i> (Kg)	<i>Middle</i> (Kg)	<i>Landward</i> (Kg)	Mean $\pm$ SD	%
<i>Tracking mangrove</i>					
Plastik	3,288	0,096	0,059	1,15 $\pm$ 1,85	54%
Foam (Busa)	0,256	0,001	0,026	0,09 $\pm$ 0,14	4%
Kain	0	0	0	0,00 $\pm$ 0,00	0%
Kaca	0	0	0	0,00 $\pm$ 0,00	0%
Metal	0,034	0	0	0,01 $\pm$ 0,02	1%
Kertas	0	0	0	0,00 $\pm$ 0,00	0%
Karet	2,56	0	0	0,85 $\pm$ 1,48	41%
Kayu	0	0	0	0,00 $\pm$ 0,00	0%
Total	6,14 $\pm$ 1,35	0,10 $\pm$ 0,03	0,09 $\pm$ 0,02	2,11 $\pm$ 3,45	100%
<i>Mangrove Pemukiman</i>					
Plastik	7,86	0	0	2,62 $\pm$ 4,54	40%
Foam (Busa)	1,967	0	0	0,66 $\pm$ 1,14	10%
Kain	2,597	0	0	0,87 $\pm$ 1,50	13%
Kaca	1,226	0	0	0,41 $\pm$ 0,71	6%
Metal	1,128	0	0	0,38 $\pm$ 0,65	6%
Kertas	0	0	0	0,00 $\pm$ 0,00	0%
Karet	4,877	0	0	1,63 $\pm$ 2,82	25%
Kayu	0	0	0	0,00 $\pm$ 0,00	0%
Total	19,66 $\pm$ 2,69	0,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	6,55 $\pm$ 11,35	100%

Hasil pengolahan data jumlah sampah laut yang ditemukan dari lokasi penelitian menunjukkan bahwa jumlah sampah terbanyak dari kedua lokasi titik pengambilan sampel adalah sampah plastik, dengan rata-rata jumlah $40,33 \pm 41,31$ item pada lokasi 1 dan $74,00 \pm 128,17$ item pada lokasi 2. Sampah foam (busa) merupakan jenis sampah yang memiliki jumlah terbanyak setelah sampah plastik dengan $3,67 \pm 3,06$ item pada lokasi 1 dan $31,00 \pm 53,69$ item di lokasi 2. Jumlah dan jenis sampah laut yang ditemukan pada lokasi 2 (mangrove dekat pemukiman) jauh lebih banyak apabila dibandingkan dengan lokasi 1 yang merupakan ekosistem mangrove di Pulau Kemujan (kawasan *tracking mangrove*). Sama seperti pada tabel 4.1 yang menyajikan kepadatan jenis sampah menurut berat, sampah yang ditemukan pada lokasi 2 di dominasi oleh sampah yang berasal dari berbagai aktivitas rumah tangga. Hal tersebut dapat terlihat dari sampah yang dikumpulkan, dimana sampah yang ditemukan merupakan sampah-sampah dari bungkus makanan seperti pembungkus makanan

berbahan plastik, foam (busa)/styrofoam yang juga banyak digunakan untuk bungkus makanan maupun peti penyimpanan ikan, botol minuman berbahan kaca, potongan baju, dan sandal berbahan karet. Gambar 6 menunjukkan grafik persebaran sampah berdasarkan zonasi mangrove. Terdapat 6 plot (zona *seaward*) dengan rincian 3 plot pada lokasi 1 dan 3 plot pada lokasi 2 yang merupakan zonasi yang paling tercemar oleh sampah, diikuti oleh zona *middle* dan *landward*. Hampir keseluruhan sampah laut (92,88%) dengan total 483 item yang ditemukan pada ekosistem mangrove terdistribusi pada zona *seaward*. Pada zona *middle* dan *landward* distribusi sampah hanya 19 item (3,65%) dan 18 item (3,46%). Persebaran sampah laut tersebut dipengaruhi oleh faktor hidro-oseanografi seperti arus, gelombang, pasang surut, dan angin yang membawa sampah laut hingga ke kawasan ekosistem mangrove. Sampah laut tersebut terjebak di sistem perakaran mangrove yang di dominasi oleh *Rhizophora* sp., *Sonneratia* sp., dan *Ceriops* sp. yang menjadi penghalang alami dari sampah laut untuk kembali ke perairan.

Tabel 2. Kepadatan Setiap Jenis Sampah Setiap Zonasi Menurut Jumlah (Item/100 m²)

Jenis Sampah	<i>Seaward</i> (Item/100 m ²)	<i>Middle</i> (Item/100 m ²)	<i>Landward</i> (Item/100 m ²)	Mean ± SD	%
Trekking mangrove					
Plastik	88	18	15	40,33±41,31	84%
Foam (Busa)	7	1	3	3,67±3,06	8%
Kain	0	0	0	0,00±0,00	0%
Kaca	0	0	0	0,00±0,00	0%
Metal	2	0	0	1,00±1,00	1%
Kertas	0	0	0	0,00±0,00	0%
Karet	10	0	0	3,33±5,77	7%
Kayu	0	0	0	0,00±0,00	0%
Total	107±30,39	19±6,32	18±5,26	48,00±51,29	100%
Mangrove Pemukiman					
Plastik	222	0	0	74,00±128,17	40%
Foam (Busa)	93	0	0	31,00±53,69	10%
Kain	13	0	0	4,00±8,00	13%
Kaca	4	0	0	1,00±2,00	6%
Metal	3	0	0	1,00±2,00	6%
Kertas	0	0	0	0,00±0,00	0%
Karet	41	0	0	13,67±23,37	25%
Kayu	0	0	0	0±0,00	0%
Total	376±77,58	0±0	0±0	125,33±217,08	100%

**Gambar 6.** Kepadatan Sampah Setiap Zonasi Menurut Jarak Pengambilan Sampel**Peta Tutupan Lahan dan Kepadatan Sampah**

Berdasarkan peta yang tersaji pada gambar 7 yang menunjukkan distribusi dari kepadatan

sampah dan penggunaan lahan, diketahui bahwa kepadatan sampah tertinggi berada di lokasi 2 yang merupakan mangrove yang berdampingan dengan

pemukiman. Kepadatan sampah terendah berada pada lokasi 1 di zona *landward*, diikuti dengan zona *middle*. Hal tersebut dapat terjadi karena sampah laut yang terbawa oleh arus, gelombang,

Hasil Analisis Uji Statistik

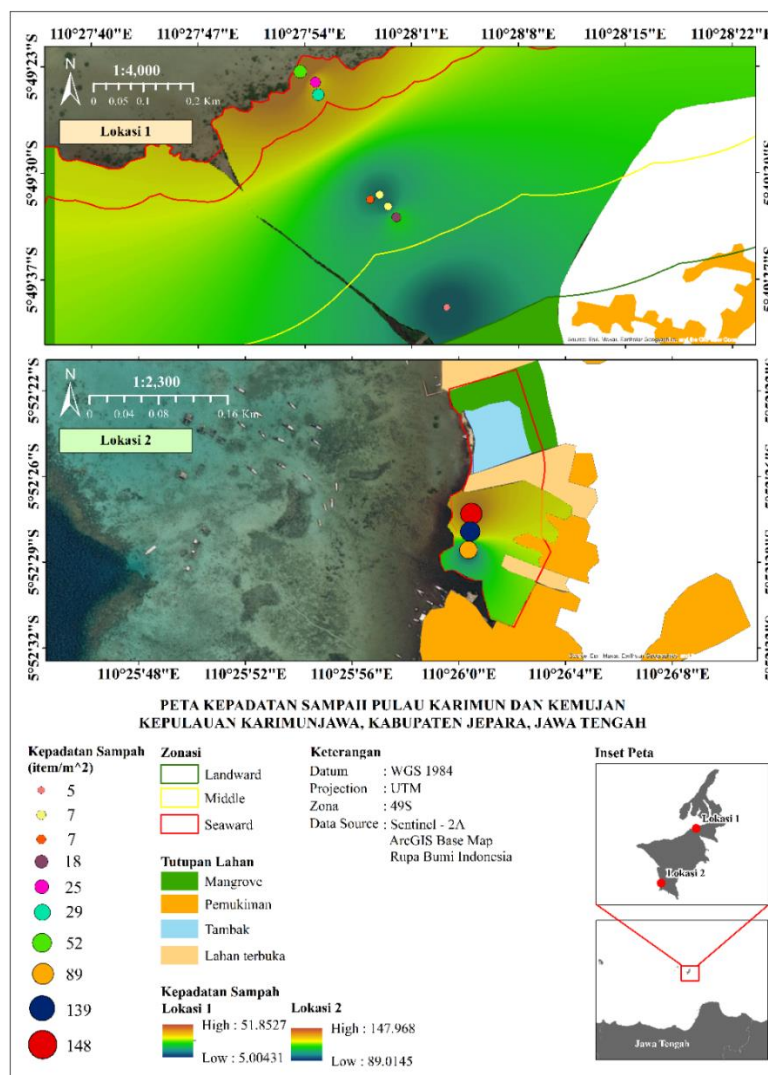
Variabel yang diuji menggunakan Independent samples t-Test terdiri dari kepadatan dan jumlah sampah. Hasil uji menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara jumlah sampah laut pada lokasi 1 dan 2 ($t(8)$: -6,984; $p = 0.000$ ($< 0,05$)). Secara rata-rata jumlah sampah

angin, dan pasang surut terjebak pada sistem perakaran mangrove di zona *seaward* sehingga sampah laut yang ditemukan terkonsentrasi pada zona *seaward*.

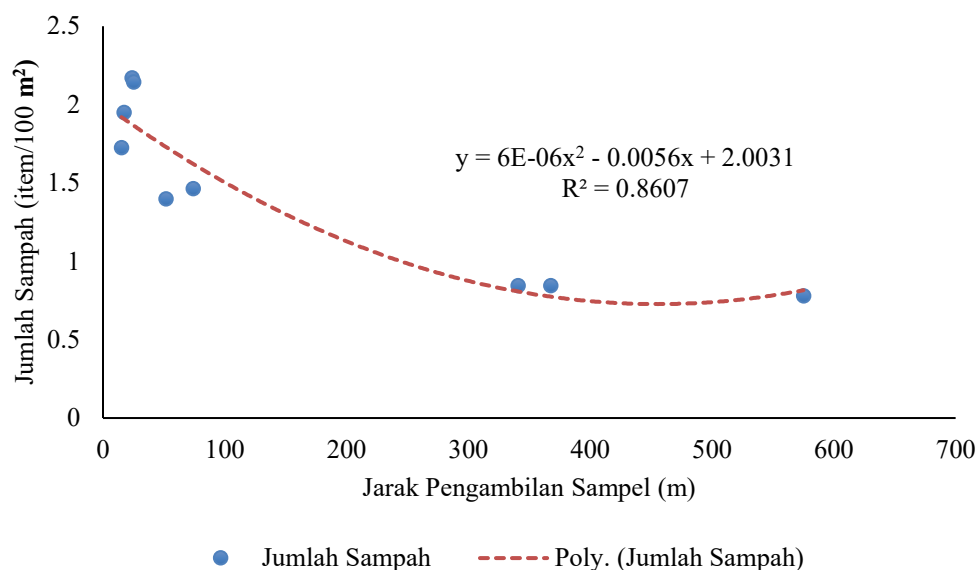
pada lokasi 1 dan 2 adalah -104,762 dengan Confidence Interval 95% (-139,354, -70,170). Berat sampah laut pada kedua lokasi penelitian juga memiliki perbedaan yang signifikan ($t(6,692) = -4,276$; $p = 0,004$ ($< 0,05$)). Rata-rata perbedaan berat sampah pada lokasi 1 lebih rendah dari lokasi 2 dengan selisih rata-rata -1,54308 kg, dengan Confidence Interval 95% (-2,40449, -0,68168).

Tabel 3. Hasil *Independent samples t-Test*

Variabel	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	95% CI of the Difference
Jumlah	-6,984	8	0,000	-104,762	(-139,354, -70,170)
Berat	-4,276	6,692	0,004	-1,54308	(-2,40449, -0,68168)



Gambar 7. Peta Tutupan Lahan dan Kepadatan Sampah



Gambar 8. Hasil Regresi Polinomial Antara Jumlah Sampah dan Jarak Pengambilan Sampel

Hasil Analisis regresi polinomial disajikan pada Gambar 8. Hasil dari model regresi polinomial menghasilkan persamaan yaitu $y = 6E-06x^2 - 0,0056x + 2,0031$. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan dari model ini sebesar 0,8607. Koefisien determinasi menunjukkan proporsi variabilitas dari variabel dependen (jumlah sampah) yang dapat dijelaskan oleh variabel independen (jarak pengambilan sampel). Artinya jarak pengambilan sampel berpengaruh sebesar 86,07% terhadap variabilitas jumlah sampah, sedangkan 86,07% dipengaruhi oleh faktor lainnya. Berdasarkan grafik yang dihasilkan, dapat diketahui bahwa jumlah sampah sangat tinggi di zona seaward, kemudian mengalami penurunan secara signifikan seiring bertambahnya jarak pengambilan sampel.

Berdasarkan hasil analisis regresi polynomial untuk variabel jarak pengambilan sampel dan berat sampah. Hasil model regresi diperoleh persamaan $y = 5E-06x^2 - 0,0039x + 0,814$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7919. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model tersebut dapat menjelaskan 79,19% variabilitas berat sampah berdasarkan jarak pengambilan sampel. Pola pada grafik menggambarkan distribusi sampah dimana pada zona seaward banyak sampah terakumulasi dan akan semakin berkurang dari bibir pantai hingga ke arah zona middle. Sampah yang ditemukan kemudian bertambah di zona landward. Hal tersebut dapat terjadi karena wilayah landward

yang menjadi pintu masuk kawasan *tracking* mangrove dan lokasi 2 yang sangat dekat dengan pemukiman sehingga memungkinkan akumulasi sampah yang berada di zona *landward*.

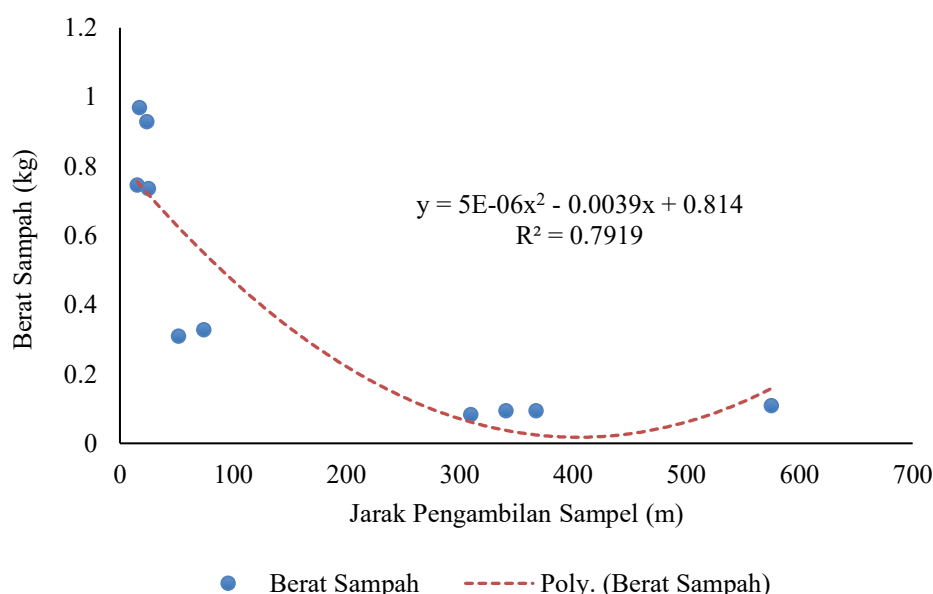
Kepadatan Sampah Laut pada Ekosistem Mangrove

Jenis sampah laut yang diperoleh pada dua lokasi pengamatan terdiri dari 6 kategori dari 8 kategori jenis sampah laut menurut UNEP/IOC (2009). Jenis sampah tersebut terdiri atas plastik, *foam* (busa), kain, kaca, metal, dan karet. Kepadatan sampah laut memiliki perbedaan yang signifikan antara lokasi 1 dan lokasi 2 setelah di analisis menggunakan *Independent t-samples test*. Berdasarkan hasil analisis, lokasi 2 memiliki rata-rata jumlah dan berat sampah yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan lokasi 1. Total keseluruhan sampah laut yang diperoleh memiliki berat 25,975 kg dengan jumlah potongan sampah sebanyak 520 item. Akumulasi sampah tersebut diperoleh dari 2 lokasi penelitian dengan total 10 plot pengambilan sampel.

Terdapat perbedaan kepadatan sampah laut baik secara berat (kg) dan jumlah (item/m²) pada kedua lokasi. Lokasi 1 yang merupakan kawasan wisata *tracking* mangrove, ditemukan 144 item sampah yang memiliki berat total 6,32 kg. Jumlah sampah terbanyak yang ditemukan adalah sampah plastik dengan total 121 item, diikuti oleh *styrofoam* 11 sebanyak item, karet sebanyak 10 item, dan metal yang ditemukan hanya 2 item. Data

sampah pada lokasi 2 yang merupakan kawasan mangrove yang dekat dengan pemukiman diperoleh sampah laut dengan jumlah sampah laut sebanyak 376 item dengan berat total 19,655 kg, jenis sampah di dominasi oleh sampah plastik dengan jumlah 222 item, diikuti oleh *styrofoam* sebanyak 93 item, karet berjumlah 41 item, kain sebanyak 13 item, kaca sebanyak 4 item, dan metal yang ditemukan hanya 3 item. Sampah-sampah yang ditemukan tersebut diduga berasal dari kegiatan rumah tangga, aktivitas laut seperti penangkapan ikan, dan aktivitas pariwisata. Hal tersebut dapat terlihat dari sampah yang ditemukan merupakan sampah yang dihasilkan dari berbagai aktivitas antropogenik. Menurut Asia dan Arifin (2017), sumber yang menjadi indikasi produksi sampah adalah dari aktivitas rumah tangga, ekowisatawan, nelayan, pedagang, industri, dan transportasi. Hal tersebut diperkuat oleh Jambeck *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa sampah laut (*marine debris*) mayoritas dihasilkan dari aktivitas antropogenik baik secara sengaja maupun tidak disengaja, seperti aktivitas pariwisata, kegiatan yang dilakukan oleh nelayan, dan sisa limbah perindustrian. Jenis sampah seperti plastik kemasan dan alat rumah tangga merupakan jenis yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari dengan sifatnya yang sulit untuk terdegradasi di alam, sampah ini dikategorikan sebagai limbah penyumbang terbesar dan menyebabkan rusaknya keseimbangan alam (Thushari & Senevirathma, 2020).

Persentase kepadatan sampah laut yang diperoleh di dominasi oleh sampah plastik sebesar 54% (lokasi 1) dan 40% (lokasi 2), diikuti oleh sampah karet sebesar 41% (lokasi 1) dan 25% (lokasi 2), sampah *styrofoam* sebesar 4% (lokasi 1) dan 10% (lokasi 2), sampah jenis metal sebesar 1% (lokasi 1) dan 6% (lokasi 2), jenis kain dan kaca yang hanya ditemukan pada lokasi 2 sebesar 13% dan 57% sampah plastik berukuran meso. Penelitian lain oleh Hayati *et al.* (2020) yang dilakukan di kepulauan wisata Tidung, Jakarta juga menunjukkan bahwa sampah plastik adalah bagian paling dominan dari keseluruhan sampah yang ditemukan, yaitu sebesar 83,86%. Penelitian yang dilakukan oleh Johan *et al.* (2020) di Pantai Kualo Kota Bengkulu, juga mengemukakan bahwa sampah anorganik yang mendominasi adalah sampah plastik dengan persentase hingga 79,05%. Kajian tentang sampah laut yang dilakukan di Kabupaten Minahasa Utara oleh Djaguna *et al.* (2019) juga menunjukkan bahwa jenis sampah yang mendominasi adalah sampah plastik sebesar 58,42%.



Gambar 9. Hasil Regresi Polinomial Antara Berat Sampah dan Jarak Pengambilan Sampel

Plastik merupakan jenis sampah yang paling mendominasi jika dibandingkan dengan jenis sampah lain. Hal tersebut dapat terjadi akibat dari besarnya konsumsi plastik oleh masyarakat, khususnya plastik sekali pakai yang umum digunakan sebagai pembungkus makanan dan akan berakhir menjadi sampah di lingkungan. Proses pengolahan limbah yang belum optimal juga menjadi faktor pendorong banyaknya sampah plastik di lingkungan. Alasan sampah plastik banyak ditemukan di lingkungan karena memiliki rantai karbon yang panjang karena ikatan kovalen yang kuat sehingga sulit diuraikan oleh mikroorganisme dan tahan terhadap degradasi lingkungan, hal tersebut yang menyebabkan plastik menjadi kategori jenis sampah yang paling banyak ditemukan karena mampu bertahan lama jika dibandingkan dengan kategori lain (Machecha *et al.*, 2024).

Sampah plastik memberikan dampak buruk kepada ekosistem mangrove baik dalam aspek ekologi, ekonomi, maupun estetika. Dampak ekologi yang ditimbulkan oleh sampah plastik yaitu menghambat proses regenerasi ekosistem mangrove. Hal tersebut dapat terjadi karena tumpukan sampah dapat menutupi akar mangrove sehingga menghambat sirkulasi udara dan air dan menghambat pertumbuhan bibit mangrove (Fatmalah *et al.*, 2022). Dampak ekonomi dari cemaran sampah plastik ini yaitu terancamnya mata pencaharian nelayan akibat penurunan produktivitas perikanan. Hilangnya tempat bagi komoditas perikanan untuk memijah, mencari makan, dan berkembang biak menjadi masalah nyata dari masuknya cemaran sampah plastik (Tekman *et al.*, 2022)). Berdasarkan sudut pandang estetika, cemaran sampah plastik di ekosistem mangrove yang menjadi kawasan ekowisata akan mengurangi daya tarik karena mengganggu pemandangan alami, menciptakan kesan kotor, dan tidak terawat (Napper & Thompson, 2020).

Hubungan Distribusi Sampah di Ekosistem Mangrove dengan Zonasi Pertumbuhan Mangrove

Secara umum ekosistem mangrove terbagi ke dalam tiga zonasi yaitu *seaward* yang merupakan zona yang paling dekat dengan laut, *middle* adalah zona tengah, dan *Landward* merupakan kawasan yang dekat dengan daratan. Data penelitian menunjukkan bahwa zona *seaward* pada lokasi 1 dan lokasi 2 memiliki kepadatan

sampah yang paling tinggi, jika dibandingkan dengan zona lainnya.

Lokasi 1 merupakan kawasan ekosistem mangrove yang memiliki tiga zonasi tersebut. Apabila dibandingkan dengan zona *middle* dan *landward* di lokasi 1. zona *landward* cenderung memiliki kepadatan sampah paling rendah jika dibandingkan dengan zona *middle*. Hal tersebut terjadi karena titik pengambilan sampel pada dua zona stratifikasi mangrove tersebut memiliki jarak yang cukup jauh dari bibir pantai. Berdasarkan kondisi lapangan zona *landward* merupakan pintu masuk ke kawasan *tracking* mangrove yang memungkinkan wisatawan membuang sampah ke kawasan ini, sehingga kepadatan sampah lebih tinggi jika dibandingkan dengan zona *middle*.

Lokasi 2 yang hanya memiliki zona *seaward* karena ketebalan ekosistem mangrove yang kurang dari 100 m. Lokasi 2 yang sangat dekat dengan pemukiman, hal tersebut menyebabkan adanya masukan sampah yang dihasilkan oleh pemukiman dan berakhir di kawasan mangrove. Akibatnya, kepadatan sampah laut pada lokasi 2 menjadi sangat tinggi, bahkan jika keseluruhan sampah laut di lokasi 1 diakumulasikan. Kepadatan sampah pada lokasi 2 di dominasi oleh jenis sampah plastik yang umum digunakan dalam aktivitas rumah tangga, seperti plastik pembungkus makanan, plastik makanan ringan, botol plastik, dan gelas plastik. Sampah – sampah ini terakumulasi pada substrat dan akar mangrove yang akan berdampak negatif bagi vegetasi mangrove maupun berbagai biota yang hidup berasosiasi dengan ekosistem mangrove. NOAA (2016) menyatakan bahwa hasil penelitian mengenai sampah laut yang terdapat di seluruh perairan di dunia, jenis sampah plastik merupakan jenis yang paling umum dan banyak dijumpai serta yang paling berisiko memberikan dampak yang cukup serius bagi organisme laut.

Sumber masukan sampah lain di lokasi 2 diduga berasal dari aktivitas nelayan. Hal tersebut terlihat dari banyaknya sisa-sisa alat tangkap seperti jaring yang tersangkut di perakaran mangrove. Sampah *styrofoam* juga mendominasi pada lokasi ini, sampah jenis tersebut diduga juga berasal dari aktivitas nelayan dan rumah tangga, di mana banyak menggunakan peti ikan dan wadah makanan berbahan *styrofoam*. Ekosistem mangrove pada lokasi 2 juga mengalami tekanan yang sangat besar akibat dari penebangan vegetasi mangrove dan alih fungsi lahan menjadi kawasan pemukiman baru. Zona *seaward* yang berhadapan langsung dengan laut lepas menyebabkan masukan

sampah laut yang terbawa oleh pasang surut air laut dan terjebak di sistem perakaran mangrove.

Hubungan Jarak Pengambilan Sampel dan Kepadatan Sampah Laut

Berdasarkan analisis regresi polinomial yang dilakukan, ditemukan hubungan signifikan antara jarak pengambilan sampel dari bibir pantai dengan kepadatan sampah laut, baik dalam jumlah (item/m²) dimana (R^2) sebesar 0,8607, maupun berat (kg/m²) R^2 sebesar 0,7919. Hasil analisis menunjukkan bahwa kepadatan sampah tertinggi terkonsentrasi pada zona *seaward*, yang merupakan area terdekat dengan laut, dengan pola penurunan yang signifikan seiring bertambahnya jarak dari bibir pantai. Fenomena tersebut serupa dengan penelitian oleh Suyadi dan Manullang (2020) yang menemukan bahwa sampah laut cenderung terakumulasi di zona terluar mangrove karena dipengaruhi oleh arus pasang-surut dan gelombang yang membawa sampah dari perairan terbuka.

Pola distribusi sampah yang ditemukan menunjukkan bahwa zona *seaward* merupakan area kritis akumulasi sampah, terutama sampah plastik dan styrofoam dengan sifatnya yang ringan sehingga mudah terbawa oleh arus. Hal ini didukung oleh penelitian Jambeck *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa sampah plastik cenderung terperangkap di zona terluar mangrove karena sifatnya yang ringan dan mudah terbawa arus. Selain itu, sistem perakaran mangrove di zona *seaward* yang didominasi oleh akar tunjang *Rhizophora* sp., dan *Ceriops* sp., serta akar nafas *Sonneratia* sp. juga berperan sebagai "perangkap alami" bagi sampah yang terbawa arus. Pada lokasi 2, yang hanya terdiri dari zona *seaward* karena ketebalan ekosistem mangrove kurang dari 100 meter, kepadatan sampah sangat tinggi. Hal ini disebabkan oleh masukan sampah antropogenik dari aktivitas rumah tangga dan nelayan, seperti limbah kemasan makanan, jaring rusak, dan *styrofoam* dari peti ikan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Lestari *et al.* (2022) yang melaporkan bahwa sampah domestik cenderung terakumulasi di zona transisi mangrove yang berbatasan dengan daratan.

Implikasi dari temuan ini adalah pentingnya pengelolaan sampah berbasis zonasi, di mana zona *seaward* perlu menjadi fokus utama pembersihan sampah karena akumulasinya yang tinggi, sementara zona *landward* memerlukan pengawasan ketat terhadap aktivitas antropogenik yang menjadi sumber sampah. Rekomendasi ini

didukung oleh studi NOAA (2016) yang menekankan pentingnya pendekatan spasial dalam pengelolaan sampah laut di ekosistem pesisir.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan bahwa sampah plastik mendominasi komposisi sampah laut di ekosistem mangrove Kepulauan Karimunjawa, baik dari segi jumlah maupun berat, dengan konsentrasi tertinggi berada di zona *seaward*. Lokasi mangrove yang berdekatan dengan pemukiman menunjukkan tingkat kepadatan sampah yang signifikan lebih tinggi dibandingkan kawasan wisata, menandakan adanya pengaruh aktivitas domestik terhadap pencemaran lingkungan pesisir. Analisis regresi polinomial menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara jarak dari pantai dengan akumulasi sampah, sehingga pendekatan zonasi penting untuk pengelolaan berbasis spasial. Temuan penting lainnya adalah peran struktur akar mangrove seperti *Rhizophora* sp. dan *Sonneratia* sp. sebagai perangkap alami sampah laut. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan, seperti cakupan lokasi yang terbatas pada dua stasiun dan tidak adanya data musiman yang dapat mempengaruhi pola distribusi sampah. Untuk itu, studi lanjutan disarankan agar mencakup area yang lebih luas, mempertimbangkan dinamika musiman dan pengaruh faktor oseanografi yang lebih rinci, serta mengembangkan model prediktif distribusi sampah berbasis integrasi data spasial dan temporal untuk mendukung strategi mitigasi yang lebih efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Asia. & Arifin, M.Z. 2017. Dampak Sampah Plastik Bagi Ekosistem Laut. *Buletin Matric*, 14(1): 44-48.
- Coe, J.M., & Rogers, D.B. 1997. Marine debris: Sources, impacts, and solutions. Springer Series on Environmental Management. Springer-Verlag: New York.
- Djaguna, A., Wilmy, E.P., Joshian, N.W.S., Hermanto, W.K.M., Natalie, D.C.R., & Erwin, L.A.N. 2019. Identifikasi Sampah Laut Di Pantai Tongkaina Dan Talawaan Bajo. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 7(3): 174-182.
- Elfayetti, E., Rosni, R., Yenny, N., Rahmadi, M.T. & Herdi, H., 2024. Analisis Laju Deforestasi Hutan Mangrove Menggunakan GIS di Kecamatan Percut Sei Tuan Kabupaten Deli

- Serdang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3): 565-570. doi: 10.14710/jil.22.3.565-570
- Fatmalah, S.F., Nor, S., & Nirmalasari, I.W. 2022. Dampak Sampah Anorganik Terhadap Vegetasi Mangrove Tingkat Semai di Ekosistem Mangrove Wonorejo Surabaya. *J-Tropimar*, 4(2): 82-96. doi: 10.30649/jrkt.v4i2.57
- Hayati, Y., Luky, A., Majariana, K., Widodo, S.P., & Fery, K. 2020. Magnitudes and tourist perception of marine debris on small tourism island: Assessment of Tidung Island, Jakarta, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 158: p.111393. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111393.
- Hidayaturohman, F., Widyorini, N. & Jati, O. E. 2021. Analisis Kepadatan Bakteri *Aeromonas hydrophila* di Perairan Rawa Pening Desa Kebondowo, Semarang. *Jurnal Pasir Laut*, 5(1): 1-8. doi: 10.14710/jpl.2021.31894
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. & Law, K.L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Journal Science*, 347(6223): 768-771. doi: 10.1126/science.1260352
- Johan Y., Renta, P. P. R., Muqsit, A., Purnama, D., Maryani, L., Hiriman, P., Rizky, F., Astuti, A. F., & Yunisti, T. 2020. Analisis Sampah Laut (*Marine Debris*) di Pantai Kualo Kota Bengkulu. *Jurnal Enggano*, 5(2): 273-289. doi: 10.31186/jenggano.5.2.273-289
- Kemertian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2021. Peta Mangrove Nasional Tahun 2021. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia.
- Lestari, P.J., Nursalam, & Salim, D. 2022. Identifikasi, Komposisi, Berat, dan Laju Pertambahan Sampah Laut (*Marine Debris*) di Kawasan Pesisir Desa Bawah Layung. *Marine, Coastal and Small Islands Journal*, 6(1): 1-11. doi: 10.20527/m.v6i1.11809
- Li, J. & Heap, A.D. 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53: 173-189.
- Liu, Z., B. Xu., B. Cheng, & X. Hu. 2021. Interpolation Parameters in Inverse Distance-Weighted Interpolation Algorithm on DEM Interpolation Error. *Journal of Sensors*, 3535195: 1-14. doi: 10.1155/2021/3535195
- Macheca, A.D. Mutuma, B., Adalima, J.L., Midheme, E., Lucas, L.H.M., Ochanda, V.K., & Mhlanga, S.D. 2024. Perspectives on Plastic Waste Management: Challenges and Possible Solutions to Ensure Its Sustainable Use. *Recycling*, 9(77): 1-66. doi: 10.3390/recycling9050077
- Napper, I. E. & Richard, C. T. 2020. Plastic Debris in the Marine Environment: History and Future Challenges. *Global Challenges*, 4(1900081): 1-9. doi: 10.1002/gch2.201900081.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2016. Marine Debris Impacts on Coastal and Benthic Habitats. NOAA (Marine Debris) Habitat Report.
- Sambu, A. H., Sribiati, I., & Chadijah, A. 2018. Model Pengelolaan Mangrove Berbasis Ekologi dan Ekonomi. *Inti Mediatama*.
- Seeruttun, L.D., Raghbor, P. & Appadoo, C. 2021. First assessment of anthropogenic marine debris in mangrove forests of Mauritius, a small oceanic island. *Marine Pollution Bulletin*, 164: p.112019. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112019.
- Sudirman, Marilyn, L.K., Made, I.E.C., Ni, L.S. A., Jan, S., Willy, Y.T., Sitti, R., Diah, O.N., Farah, I., Nurul, L.F., Nurul, A., Nia, K., Aditya, W., & Tita, H. 2023. Metodologi Penelitian 1. Media Sains Indonesia: Bandung.
- Suyadi dan Manullang, C. Y. 2020. Distribution of Plastic Debris Pollution and it is Implications on Mangrove Vegetation. *Marine Pollution Bulletin*, 160: p.111642. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111642
- Tekman, M.B., Walther, B.A., Peter, C., Gutow, L. & Bergmann, M. 2022. Impacts of plastic pollution in the oceans on marine species, biodiversity and ecosystems, 1–221, WWF Germany, Berlin.
- Thushari, G.G.N. & Senevirathna, J.D.M. 2020. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6: e04709. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04709