



Perancangan *Breakwater* Terapung Ramah Lingkungan Berbasis Data Oseanografi Lokal di Teluk Love

Rusdiana Setyaningtyas^{1*}, Musarofa¹, Winda Islamiyah Umarie¹, Dio Aji Saputra¹, Hilmi Alivia Sahrul Gafur¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jember, Jawa Timur 68121

*Korespondensi: rusdiana@unmuhjember.ac.id

Abstrak. Kawasan pesisir Teluk Love, Pantai Payangan di Kabupaten Jember menghadapi tekanan abrasi dan gelombang tinggi yang berulang setiap musim transisi, sementara pendekatan struktur pelindung konvensional terbukti tidak efektif dan tidak berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan merancang sistem *breakwater* terapung modular berbahan HDPE yang mampu mereduksi $\geq 60\%$ energi gelombang, dengan mempertimbangkan kondisi oseanografi lokal, stabilitas struktur, dan prinsip keberlanjutan. Pendekatan desain berbasis data digunakan, melibatkan parameter tinggi gelombang signifikan ($H_s = 1,81$ m), periode gelombang 8–10 detik, dan kedalaman 5–10 meter. Perhitungan gaya gelombang ($F_w = 49.413$ N), gaya angin ($F_a = 441$ N), serta gaya apung dan kebutuhan *ballast* (6,12 ton) dilakukan untuk memastikan stabilitas hidrostatik dan dinamis. Evaluasi efektivitas redaman dilakukan melalui pendekatan koefisien transmisi ($K_t \approx 0,55$), menghasilkan redaman energi sebesar 69,75%. Sistem tambat dirancang dengan empat titik *mooring* per modul, masing-masing menahan gaya lateral hingga 12.464 N. Kajian keberlanjutan menunjukkan bahwa desain bersifat modular, ramah lingkungan, serta mendukung integrasi sosial-wisata di kawasan pesisir. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *breakwater* terapung yang diusulkan layak diterapkan pada perairan semi-terlindung seperti Teluk Love, dengan keunggulan adaptabilitas, efisiensi material, dan minimal dampak ekologis dibandingkan struktur konvensional. Desain ini dapat menjadi rujukan alternatif teknis dalam perlindungan pesisir berkelanjutan di wilayah Indonesia.

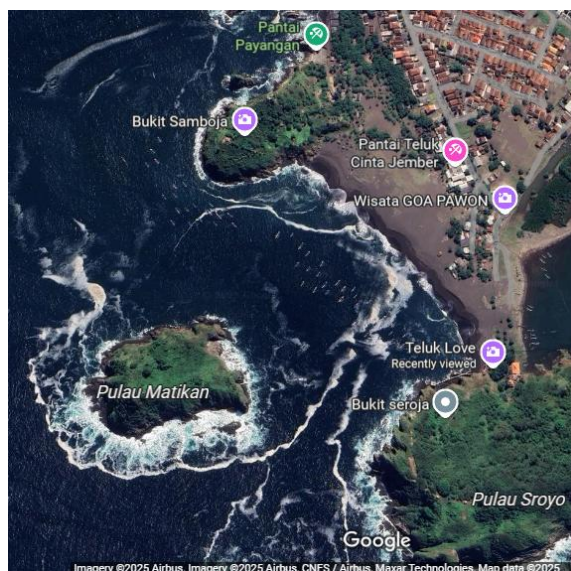
Kata Kunci: *breakwater* terapung, infrastruktur berkelanjutan, proteksi pantai, redaman energi gelombang, Teluk Love Jember

1. PENDAHULUAN

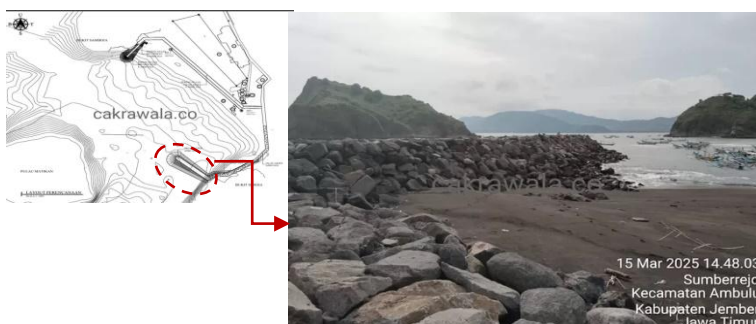
Teluk Love merupakan salah satu kawasan pesisir strategis di Kabupaten Jember yang secara geografis terletak di antara Bukit Seroja dan Bukit Samboja, yaitu pada koordinat $8^{\circ}26'27,14''$ LS dan $113^{\circ}34'58,10''$ BT, menghadap langsung ke Samudera Hindia (Gambar 1). Secara administratif, teluk ini berada di wilayah Desa Sumberejo, Kecamatan Ambulu, dan secara visual membentuk lekukan menyerupai simbol hati. Teluk Love merupakan bagian dari gugusan pesisir Payangan–Watu Ulo yang tergolong dalam zona rawan bencana. Gelombang pasang, abrasi musiman, dan potensi tsunami menjadi ancaman nyata bagi ekosistem dan aktivitas sosial-ekonomi masyarakat di sekitarnya. Laporan resmi Pemerintah Kabupaten Jember melalui Pejabat

Pengelola Informasi dan Dokumentasi (PPID), mencatat bahwa abrasi dan gelombang tinggi masih terjadi secara berkala dan menyebabkan kerusakan vegetasi pantai serta infrastruktur wisata dan nelayan (PPID Jember, 2024). Upaya konservasi seperti penanaman cemara laut telah dilakukan masyarakat, namun pendekatan rekayasa teknis yang lebih adaptif dan berkelanjutan tetap dibutuhkan untuk memperkuat perlindungan pantai.

Lebih lanjut, di kawasan pesisir Pantai Payangan—tepatnya di antara Bukit Samboja dan Bukit Seroja—telah dibangun struktur *breakwater* konvensional berbasis batu gajah oleh Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Jawa Timur (Gambar 2). Namun, proyek tersebut dilaporkan mengalami kerusakan berat akibat tekanan gelombang tinggi yang tidak diantisipasi secara memadai (Arrizal, 2025), dengan tinggi gelombang laut tercatat hampir mencapai 4 meter di wilayah Jember Selatan (PPID Jember, 2024). Hasil temuan lapangan mengindikasikan adanya penyimpangan pelaksanaan, termasuk kesalahan pemasangan tetrapod, yang berdampak pada lemahnya performa struktural di lapangan. Kasus ini menegaskan bahwa pendekatan konvensional tidak selalu efektif, terutama di lokasi dengan dinamika oseanografi tinggi dan nilai sosial-ekologis yang kompleks.



Gambar 1. Lokasi penelitian (Sumber: Google Map, 2025)



Gambar 2. *Breakwater* eksisting di Pantai Payangan (Sumber: Arrizal, 2024)

Perlindungan pesisir yang adaptif dan berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak dalam menghadapi tekanan abrasi, perubahan iklim, dan aktivitas pariwisata yang terus meningkat. Kajian awal oleh Wiegel (1960) telah menginventarisasi struktur *breakwater* terapung sebagai alternatif pelindung pantai di kawasan yang tidak memungkinkan konstruksi fondasi tetap, khususnya di perairan dalam dan semi-terlindung. Seiring perkembangan teknologi, *breakwater* terapung semakin banyak diterapkan di berbagai wilayah dunia sebagai solusi inovatif yang menyeimbangkan fungsi proteksi dan konservasi lingkungan. PIANC (1994) menyebutkan bahwa “*breakwater* terapung digunakan untuk melindungi pelabuhan kapal kecil serta sebagai perangkat pelindung pantai di berbagai lokasi di seluruh dunia,” karena kemampuannya dalam menjaga sirkulasi air dan meminimalkan gangguan terhadap transportasi sedimen serta migrasi organisme laut.

Dari sisi rekayasa, McCartney (1985) mengklasifikasikan struktur ini ke dalam empat tipe utama –*Box*, *Pontoon*, *Mat*, dan *Tethered Float*– dan menekankan bahwa efektivitas redamannya menurun signifikan untuk gelombang dengan periode di atas 4–5 detik tanpa desain inovatif atau peningkatan massa struktural. Studi kontemporer turut memperkuat relevansi teknologi ini, di mana *breakwater* terapung terbukti memiliki fleksibilitas konfigurasi, efisiensi biaya, kemudahan pemeliharaan, dan daya dukung visual yang lebih baik dibandingkan struktur tetap (Wang & Nguyen, 2022; Kropf Marine, n.d.). Bahkan, hasil uji laboratorium mutakhir menunjukkan bahwa *breakwater* dengan pelat vertikal berpori, sayap lengkung, dan konfigurasi apung dinamis mampu meredam hingga 60 – 80% energi gelombang dengan dampak lingkungan minimal (Shen et al., 2022; Wu et al., 2024).

Penelitian Sujantoko et al. (2021) menunjukkan bahwa konfigurasi dan sudut *mooring* pada struktur *breakwater* terapung tipe tambat dan pancang secara signifikan memengaruhi efisiensi transmisi gelombang, dengan hasil optimum pada konfigurasi tipe tambat lebar 30 cm yang menghasilkan koefisien transmisi sebesar 0,79 pada sudut *mooring* 45° dalam skala laboratorium. Temuan ini mendukung pengembangan desain *breakwater* terapung yang responsif terhadap kondisi hidrodinamika lokal. Dalam konteks Teluk Love, Jember—dengan karakteristik semi-terlindung, nilai ekologis tinggi, dan tekanan wisata bahari—pendekatan berbasis data lokal menjadi strategi teknis yang adaptif dan berkelanjutan.

Di Indonesia, pendekatan perlindungan pantai masih banyak didominasi oleh struktur konvensional seperti *revetment*, *groin*, *jetty* dan *seawall* permanen yang bersifat kaku dan kurang adaptif terhadap dinamika garis pantai. Studi oleh Jade et al. (2017) yang mengevaluasi struktur pelindung di kawasan Pelabuhan Patimban, Kabupaten Subang, Jawa Barat, menunjukkan bahwa perencanaan bangunan pelindung pantai dan dermaga masih bertumpu pada pendekatan dominan struktural konvensional, dengan orientasi utama pada gelombang maksimum dan proses sedimentasi lokal. Pendekatan ini umumnya mengabaikan fleksibilitas adaptif dan keberlanjutan ekologis. Temuan serupa juga diungkapkan oleh Tarore et al. (2024) dalam evaluasi struktur *seawall* di kawasan pesisir Bahu Mall, Kota Manado. Berdasarkan data pasang surut dan hasil *run-up*, *seawall* eksisting dinyatakan tidak efektif dalam mereduksi energi gelombang, bahkan mengalami *overtopping* dan kerusakan struktural. Studi ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan proteksi pantai yang tidak hanya tangguh secara struktural, tetapi juga responsif terhadap tekanan oseanografi aktual dan berkelanjutan dari sisi lingkungan serta sosial. Sebagai gambaran, Tabel 1 menunjukkan perbandingan antara beberapa jenis struktur bangunan proteksi pantai.

Tabel 1. Perbandingan jenis struktur proteksi pantai

Struktur	Arah pemasangan	Fungsi utama	Lokasi umum	Keterangan
Tanggul Laut (<i>sea dike</i>)	Paralel (belakang pantai)	Proteksi genangan pasang & badai	Pesisir rendah, lahan pertanian, permukiman	Umumnya tanah/beton; proteksi daratan
Tembok Laut (<i>seawall</i>)	Sejajar garis pantai	Mencegah limpasan & memperkuat profil pantai	Pantai urban, jalan pesisir, pelabuhan	Kaku; memantulkan gelombang → erosi
<i>Revetment</i>	Sejajar garis pantai (miring)	Redam gelombang & stabilisasi lereng	Pantai alami, lereng tebing, <i>boulevard</i>	Ramah lingkungan; menyerap energi
Krib (<i>Groin</i>)	Tegak lurus garis pantai	Menjebak sedimen & stabilisasi pantai	Pantai berpasir, zona akresi	Sisi hilir berpotensi erosi
Jeti (<i>Jetty</i>)	Tegak lurus di muara	Stabilkan alur pelayaran & muara	Muara sungai, pelabuhan, estuaria	Dibangun berpasang-an; arahkan arus
Pengisian Pasir (<i>sand nourishment</i>)	Sejajar garis pantai (zona erosi)	Cegah erosi & suplai sedimen alami	Pantai wisata, zona konservasi	Solusi lunak; perlu pengulangan
<i>Breakwater</i> Lepas Pantai	Paralel/semi-paralel	Redam energi gelombang sebelum ke pantai	Laut dekat pelabuhan / teluk, pantai terbuka	Bisa terapung; kurangi transpor sedimen
Terumbu Buatan / <i>Sills</i>	Terendam (paralel)	Redam gelombang & dukung habitat laut	Zona konservasi, teluk semi-terlindung	Efek ekologis positif; tidak ganggu visual

Sumber: SE Kementerian PU No. 07/SE/M/2010 dalam Mulyono & Ladesi (2021)

Permasalahan terjadinya abrasi dan gelombang tinggi yang masih terjadi secara berkala, termasuk kegagalan teknis dari *breakwater* berbasis batu gajah di sekitar gugusan Payangan–Watu Ulo memperlihatkan bahwa pendekatan struktural kaku tidak memadai dalam menghadapi dinamika oseanografi lokal. Di sisi lain, Teluk Love memiliki karakteristik morfologis semi-terlindung dan arah dominan gelombang selatan, yang secara teoritis sesuai untuk penerapan struktur terapung modular. Namun, hingga saat ini belum tersedia desain *breakwater* terapung yang dirancang secara spesifik berdasarkan parameter oseanografi lokal, terutama tinggi gelombang signifikan maksimum (H_s) sebesar 1,81 m selama Musim Peralihan I (Maret – Mei 2023), sebagaimana dicatat dalam studi oseanografi terbaru oleh Susanto et al. (2024). H_s sebesar 1,81 m menjadi angka krusial dalam mendasari kebutuhan desain struktur pelindung yang tangguh namun adaptif secara lokal. Tantangan utama terletak pada bagaimana merancang sistem proteksi yang tidak hanya efektif secara hidrodinamik, tetapi juga memenuhi prinsip keberlanjutan lingkungan dan sosial masyarakat pesisir.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini ditujukan untuk: (1) merancang sistem *breakwater* terapung modular berbahan HDPE yang mampu mereduksi $\geq 60\%$ energi gelombang berdasarkan karakteristik Teluk Love; (2) menghitung gaya apung, kebutuhan *ballast*, dan stabilitas struktur berdasarkan $H_s = 1,81$ meter; serta (3) mengevaluasi kesesuaian desain terhadap prinsip keberlanjutan lingkungan dan sosial di kawasan pesisir Teluk Love.

2. METODE PENELITIAN

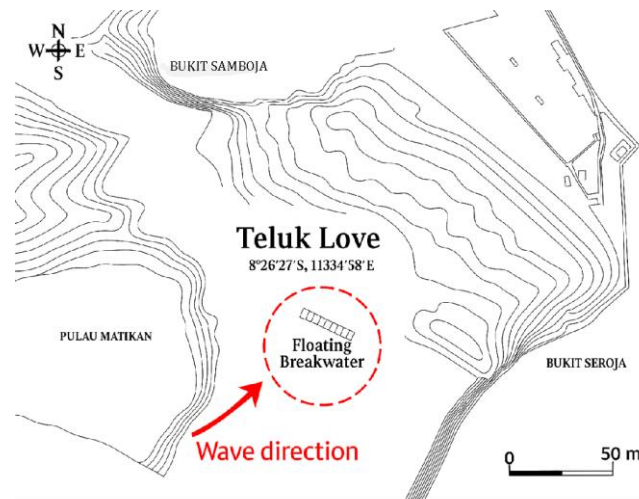
2.1 Jenis Data dan Metode Perhitungan

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis data oseanografi lokal untuk mendukung perancangan struktur *breakwater* terapung. Data utama berupa tinggi gelombang signifikan ($H_s = 1,81$ m) diperoleh dari hasil penelitian Susanto et al. (2024) di Teluk Love, Jember, selama musim peralihan I (Maret – Mei 2023). Parameter teknis lainnya seperti massa jenis air

laut (1025 kg/m^3), massa jenis udara (1225 kg/m^3), dan kecepatan angin maksimum (10 m/s) diperoleh dari data sekunder BMKG dan literatur teknik pantai.

2.2 Lokasi Modul Breakwater Terapung

Peta lokasi penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Adapun penempatan modular *breakwater* terapung ditampilkan dalam Gambar 3. Tampak modul terletak di Teluk Love, di antara Bukit Seroja dan Bukit Samboja yang merupakan tempat tambatan perahu-perahu nelayan, dan berjarak sekitar 50 m dari garis pantai. *Breakwater* terapung ini akan menahan gelombang atau arus yang datang dari arah selatan, sehingga mereduksi energi hantaman gelombang pada perahu nelayan dan juga abrasi di sepanjang pantai.



Gambar 3. Lokasi modul *breakwater* terapung di Teluk Love

2.3 Parameter Desain Awal

Dimensi modul ditentukan berdasarkan observasi lapangan dan kebutuhan proteksi pesisir. Modul dirancang dengan panjang 12 m, lebar 3 m, dan tinggi 2 m, menggunakan material HDPE dengan massa jenis 970 kg/m^3 . Panjang total struktur terapung adalah 120 m, terdiri dari 10 segmen modular. Tabel 2 menyajikan parameter awal perancangan *breakwater* terapung di Teluk Love.

Tabel 2. Parameter awal perancangan *breakwater* terapung di Teluk Love

Parameter	Nilai	Satuan	Sumber	Keterangan
Panjang total <i>breakwater</i>	120	m	Pengukuran	Target panjang proteksi pesisir
Panjang modul	12	m	Ditentukan	Tiap segmen terdiri dari 12 m
Lebar modul	3	m	Ditentukan	Modul berbahan HDPE
Tinggi modul	2	m	Ditentukan	Tinggi total (bagian apung dan terbenam)
Volume modul	72	m^3	Perhitungan	$12 \times 3 \times 2$
Massa jenis HDPE	970	kg/m^3	Data sekunder	Berat jenis material modul apung
Massa jenis air laut	1025	kg/m^3	Data sekunder	Standar laut terbuka
Gelombang signifikan (H_s)	1,81	m	Susanto et al. (2024)	Data Musim Peralihan I 2023
Periode gelombang (T)	8 – 10	detik	BMKG / model lokal	Perlu untuk evaluasi redaman dan stabilitas
Kecepatan angin maksimum	10	m/s	BMKG / simulasi	Faktor desain sistem tambatan
Kedalaman air di lokasi	5 – 10	m	Survei batimetri	Terkait panjang <i>mooring</i> & massa tambat
Jenis dasar laut	Pasir kasar		Observasi lokal	Terkait sistem jangkar / penanaman tambat

Sumber: Hasil observasi dan data sekunder (2025)

2.4 Metode Perhitungan Gaya dan Stabilitas

Perhitungan gaya dan stabilitas dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus hidrodinamika standar dalam teknik pantai (McCartney, 1985; USACE, 2002). Gaya gelombang (F_w) dihitung dengan pendekatan linier sebagai berikut:

$$F_w = 0,5 \times \rho_{air} \times g \times H_s^2 \times B \quad (1.1)$$

di mana:

- F_w = gaya gelombang (N)
- ρ_{air} = massa jenis air laut (1025 kg/m³)
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- H_s = tinggi gelombang signifikan (m)
- B = lebar struktur (m)

Gaya apung (*Buoyancy Force*/ F_b) dihitung berdasarkan volume terendam (V_{draft}):

$$F_b = V_{draft} \times \rho_{air} \times g \quad (1.2)$$

V_{draft} diasumsikan sebesar 50% dari volume total modul, yaitu 36 m³.

Gaya hambat angin pada struktur (F_a) dihitung dengan rumus *drag force*:

$$F_a = 0,5 \times \rho_{udara} \times C_d \times A \times V^2 \quad (1.3)$$

dengan:

- F_a = gaya angin atau gaya hambat (N)
- ρ_{udara} = densitas udara di permukaan laut (1225 kg/m³)
- C_d = 1,2 (untuk bentuk kubus, non-dimensi)
- A = luas permukaan terkena angin, lebar x tinggi modul (m²)
- V = kecepatan angin relatif terhadap objek (m/s)

Total gaya lateral:

$$F_{total} = F_w + F_a \quad (1.4)$$

Berat *ballast*:

$$W_{ballast} = \frac{F_{total}}{g} + \text{margin keamanan } 20\% \quad (1.5)$$

Berat Modul (tanpa *ballast*):

$$W_m = V \times \rho_{HDPE} \times g \quad (1.6)$$

2.5 Evaluasi Efektivitas Redaman Energi Gelombang

Efektivitas redaman dihitung menggunakan koefisien transmisi gelombang (K_t), yang dirumuskan sebagai:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1.7)$$

dengan:

- $H_i = H_s$ = tinggi gelombang datang
- H_t = tinggi gelombang yang diteruskan ke belakang struktur

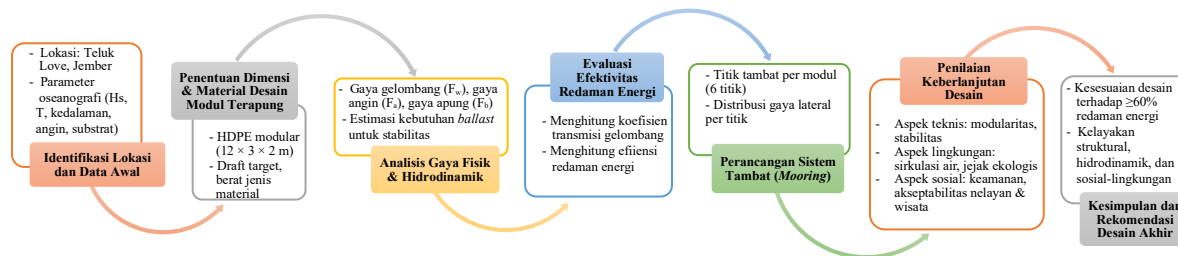
Efisiensi redaman energi kemudian dihitung dengan rumus:

$$Efisiensi_{redaman} = (1 - K_t^2) \times 100\% \quad (1.8)$$

Nilai K_t yang diperoleh dari desain ini akan dibandingkan dengan hasil studi sebelumnya, termasuk oleh Seabrook & Hall (1999), yang mengevaluasi transmisi gelombang pada *submerged rubblemound breakwaters*, serta oleh Losada et al. (1996), yang menganalisis interaksi gelombang acak dengan struktur berpori terendam. Kedua studi tersebut memberikan landasan empiris dan teoritis yang relevan untuk validasi desain serta analisis efisiensi struktur.

2.6 Alur Penelitian

Secara umum, proses perancangan breakwater terapung di Teluk Love dilakukan dengan alur seperti dalam Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Alur pelaksanaan perancangan *breakwater* terapung di Teluk Love

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Hasil Perhitungan

Hasil perhitungan gaya hidrodinamik, gaya apung, dan *ballast* dalam perancangan breakwater terapung ini disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan perancangan modul *breakwater* terapung di Teluk Love

Komponen	Nilai
Gaya gelombang (F_w)	49.413 N
Gaya apung (F_b)	361.989 N
Gaya angin (F_a)	441 N
Total gaya lateral (F_{tot})	49.854 N
<i>Ballast</i> yang diperlukan	± 6,12 ton beton ringan per modul
Titik <i>mooring</i>	4 titik per modul
Kapasitas minimum <i>mooring</i>	12.464 N per titik
Panjang total modular	120 m (10 modul × 12 m)

Sebagai contoh, disajikan perhitungan gaya gelombang berdasarkan Persamaan 1.1:

$$F_w = 0,5 \times 1025 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 1,81^2 \times 3 = 49.413 \text{ N}$$

Untuk sistem *mooring*, setiap modul dilengkapi dengan empat titik *mooring*, masing-masing terletak di sisi kiri dan kanan (tiga titik per sisi). Dengan asumsi distribusi gaya yang seimbang, maka kapasitas minimum yang harus dimiliki oleh setiap tali *mooring*:

$$F_{mooring} = \frac{F_{tot}}{4} = \frac{49.854}{4} = 12.464 \text{ N}$$

Nilai ini menjadi acuan dalam pemilihan jenis tali, jangkar, dan konfigurasi sistem *mooring* agar mampu menahan gaya lingkungan secara efektif, sekaligus menjaga integritas struktural dan fungsi modul *breakwater* dalam jangka panjang.

Perhitungan efektivitas desain dalam meredam energi gelombang, menggunakan pendekatan koefisien transmisi dengan Persamaan 1.7. Dalam beberapa studi, nilai K_t bisa diperkirakan secara empiris berdasarkan rasio $draft/H_s$. *Draft* adalah kedalaman bagian struktur yang terbenam di bawah permukaan air. Sehingga berdasarkan desain $draft = 1 \text{ m}$ dan $H_s = 1,81 \text{ m}$, maka:

$$\frac{draft}{H_s} = \frac{1}{1,81} \approx 0,55 \rightarrow K_t \approx 0,55$$

Berdasarkan Persamaan 1.8 dapat dihitung efisiensi redaman energi dari desain *breakwater* terapung: $Efisiensi_{redaman} = (1 - 0,55^2) \times 100\% \approx 69,75\%$

3.2 Efektivitas Redaman Energi Gelombang

Efektivitas modul *breakwater* terapung dalam meredam energi gelombang dievaluasi melalui pendekatan koefisien transmisi gelombang (K_t). Berdasarkan rasio antara *draft* struktur dan tinggi gelombang signifikan (H_s), diperoleh nilai K_t sebesar 0,55, yang menunjukkan bahwa sekitar 69,75% energi gelombang berhasil direduksi oleh struktur. Capaian ini melampaui ambang batas teknis minimal sebesar 60% yang ditetapkan dalam tujuan perancangan.

Sebagai perbandingan, Seabrook & Hall (1999) melaporkan nilai K_t berkisar antara 0,60–0,70 untuk struktur *rubblemound* terendam dengan konfigurasi *crest* lebar dan *submergence* sedang. Sementara itu, Losada et al. (1996) menunjukkan nilai K_t dalam rentang 0,50–0,65 pada struktur berpori terapung yang diuji terhadap gelombang acak. Dengan demikian, desain modul yang dikembangkan dalam studi ini menunjukkan kinerja redaman yang kompetitif, bahkan lebih baik dibandingkan beberapa konfigurasi konvensional yang telah diuji secara eksperimental dan numerik. Hasil perbandingan nilai K_t dan efisiensi redaman dari desain ini dengan studi sebelumnya disajikan dalam Tabel 4. Dengan efisiensi redaman gelombang sebesar 69,75% menunjukkan bahwa dimensi dan konfigurasi modul telah memenuhi syarat untuk digunakan di wilayah semi-terlindung seperti Teluk Love, di mana gelombang dominan memiliki karakteristik periodik dengan $H_s < 2 \text{ meter}$. Efektivitas redaman juga didukung oleh desain *draft* yang proporsional terhadap tinggi gelombang, serta distribusi massa yang stabil melalui *ballast*, yang berkontribusi terhadap kestabilan dinamis dan respons struktur terhadap gelombang.

Tabel 2. Perbandingan koefisien transmisi gelombang (K_t)

Sumber Studi	Jenis Struktur	Rentang Nilai K_t	Efisiensi Redaman (%)	Catatan Khusus
Desain ini	<i>Breakwater</i> terapung modular	0,55	69,75%	<i>Draft</i> proporsional terhadap H_s ; stabil dengan <i>ballast</i>
Seabrook & Hall (1999)	<i>Submerged rubblemound breakwater</i>	0,60 – 0,70	51% – 64%	Efisiensi tergantung lebar <i>crest</i> dan kedalaman <i>submergence</i>
Losada et al. (1996)	Struktur berpori terapung (numerik & eksperimen)	0,50 – 0,65	57% – 75%	Respons terhadap gelombang acak; mempertimbangkan massa dan redaman

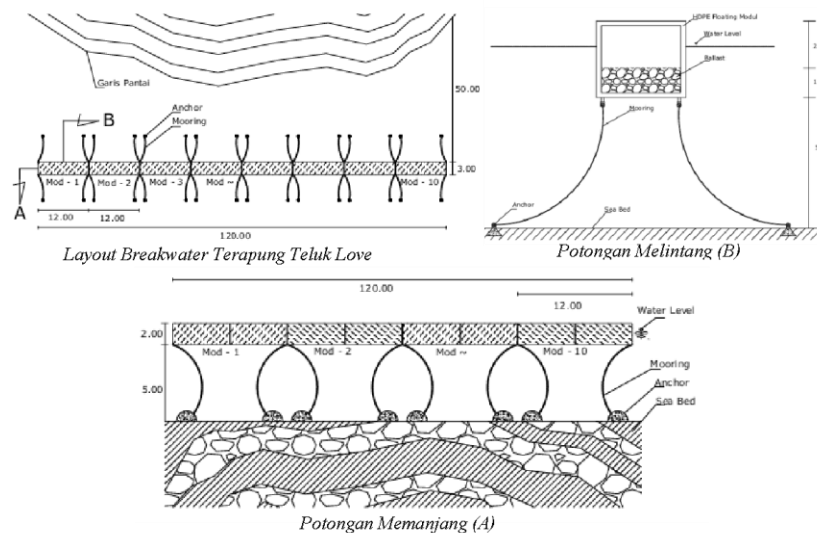
Sumber: Data desain ini (2025); Seabrook & Hall (1999); Losada et al. (1996)

3.3 Stabilitas Struktural dan Sistem Tambat

Analisis gaya dan massa menunjukkan bahwa struktur memiliki keseimbangan gaya yang memadai, baik secara vertikal maupun horizontal. Gaya apung ($F_b = 361.989$ N) jauh melebihi total gaya lateral ($F_{tot} = 49.854$ N) yang bekerja, sehingga modul tetap stabil dalam kondisi gelombang maksimum. Penambahan *ballast* beton ringan sebesar $\pm 6,12$ ton per modul berfungsi meningkatkan momen inersia dan meredam gerakan *heave* (vertikal) serta *pitch* (rotasi lateral) secara efektif. Strategi penambahan massa internal untuk mengatur periode *heave* dan mengurangi respons dinamis struktur sejalan dengan prinsip desain *breakwater* terapung yang telah dibahas oleh Dai et al. (2018) dan Samuel et al. (2025), yang menekankan pentingnya kontrol massa dan distribusi beban dalam meredam respons gelombang acak. Pendekatan ini juga didukung oleh studi Iskandar (2015), yang menunjukkan bahwa konfigurasi massa dan geometri modul berpengaruh langsung terhadap nilai RAO (*Response Amplitude Operator*) pada struktur *H-Float*.

Sistem tambat dirancang menggunakan konfigurasi empat titik *mooring* per modul, dengan kapasitas 12.464 N per titik. Nilai ini ditetapkan berdasarkan distribusi gaya lateral maksimum yang terjadi pada struktur terapung, sehingga setiap titik tambat mampu menahan beban sebesar seperempat dari total gaya lateral. Konfigurasi ini dirancang untuk menahan pergeseran dan rotasi berlebih akibat gelombang dengan periode dominan 8–10 detik, sebagaimana tercatat dalam data oseanografi lokal. Studi oleh Al-Sairafi et al. (2024) menunjukkan bahwa konfigurasi tambat yang terdistribusi secara simetris mampu meningkatkan performa hidrodinamik dengan mengurangi amplitudo gerakan struktur dan mendistribusikan gaya tambat secara lebih merata, terutama pada kondisi gelombang acak.

Dengan mempertimbangkan aspek gaya, massa, dan sistem tambat, modul terapung dinyatakan memenuhi kriteria stabilitas struktural dan kelayakan operasional untuk diterapkan sebagai *breakwater* dalam lingkungan pesisir dengan karakteristik gelombang sedang hingga tinggi. Konfigurasi perhitungan teknis tersebut divisualisasikan dalam Gambar 4, yang menunjukkan penempatan *ballast* di dalam modul HDPE, kedalaman *draft*, serta sistem *mooring* ke dasar laut.



Gambar 4. Sketsa rancangan modul *breakwater* terapung berbahan HDPE dengan *ballast* dan sistem *mooring*

3.4 Evaluasi Keberlanjutan Desain

Keberlanjutan perancangan *breakwater* terapung dievaluasi melalui tiga aspek utama: teknis-struktural, ekologi pesisir, dan integrasi sosial. Dari sisi teknis, penggunaan material *High-Density Polyethylene* (HDPE) memberikan sejumlah keunggulan, antara lain bobot yang ringan, ketahanan terhadap korosi air laut, serta kemudahan dalam proses perakitan, pembongkaran, dan relokasi. Karakteristik ini menjadikan HDPE sebagai material yang efisien untuk struktur modular di lingkungan laut tropis. Studi oleh Armono et al. (2012) menunjukkan bahwa modul HDPE terapung memiliki performa redaman gelombang yang kompetitif dan dapat disusun ulang sesuai kebutuhan operasional tanpa pembongkaran total.

Desain modular juga memungkinkan pemeliharaan sistem secara parsial dan adaptif terhadap perubahan kondisi laut, termasuk kenaikan muka air laut dan fluktuasi gelombang. Hal ini sejalan dengan temuan Ajiwibowo (2018), yang menunjukkan bahwa konfigurasi struktur terapung dapat disesuaikan untuk menghadapi variasi gelombang pendek hingga menengah dengan efisiensi transmisi gelombang (K_t) yang tetap terjaga.

Dari aspek ekologi, struktur terapung lebih ramah lingkungan dibanding *breakwater* konvensional karena hanya menyebabkan gangguan minimal pada sirkulasi air dan transportasi sedimen. Sistem tambat titik yang ditanam di dasar pasir memungkinkan pemasangan non-invasif dengan jejak ekologis rendah, artinya dampak terhadap habitat dasar laut dan organisme sekitarnya relatif kecil. Teh et al. (2025) menegaskan bahwa *breakwater* terapung efektif meredam energi gelombang sekaligus mempertahankan sirkulasi air dan transportasi sedimen alami, sehingga menjadi metode perlindungan pantai yang ramah lingkungan.

Secara sosial, desain ini tidak mengganggu lintasan perahu nelayan dan memiliki potensi integrasi dengan fungsi wisata, seperti *promenade* terapung (jalur pejalan kaki di atas air), zona penyangga visual, atau *platform* edukatif pesisir. Konsep arsitektur apung modular yang fleksibel telah dikaji oleh Angelina dan Winata (2021) sebagai pendekatan adaptif terhadap krisis ruang dan ekosistem di wilayah pesisir urban, dengan potensi kontribusi terhadap keberlanjutan sosial dan ekonomi masyarakat sekitar.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang sistem *breakwater* terapung modular berbahan HDPE yang mampu mereduksi energi gelombang sebesar 69,75%, melampaui target teknis $\geq 60\%$ sesuai karakteristik Teluk Love. Perhitungan gaya apung, kebutuhan *ballast* sebesar $\pm 6,12$ ton per modul, dan sistem tambat empat titik menunjukkan struktur memiliki stabilitas yang memadai terhadap gelombang signifikan ($H_s = 1,81$ m). Evaluasi keberlanjutan desain menunjukkan kesesuaian terhadap prinsip teknis, ekologis, dan sosial, menjadikan sistem ini sebagai solusi perlindungan pantai yang adaptif dan berkelanjutan di kawasan pesisir tropis. Desain ini layak diterapkan di Teluk Love dan berpotensi direplikasi di wilayah pesisir tropis lainnya dengan karakteristik serupa. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji efektivitas sistem ini dalam kondisi oseanografi yang berbeda, serta mengeksplorasi integrasi fungsi tambahan seperti wisata terapung atau habitat buatan guna memperluas manfaat sosial-ekologis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ketua Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember atas informasi dan fasilitasi partisipasi dalam Seminar Nasional Teknik Lingkungan (SNTL) Universitas Islam Indonesia. Kegiatan ini terlaksana berkat kerja sama antara Prodi Teknik Lingkungan UM Jember dan Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, UII, sehingga memungkinkan penulis berkontribusi sebagai pemateri tanpa biaya. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para dosen dan mahasiswa yang telah memberikan dukungan dalam proses penulisan artikel ini, baik dalam bentuk diskusi akademik, penyuntingan naskah, maupun penyusunan data teknis.

REFERENSI

- Ajiwibowo, H. (2018). Pemodelan fisik 3-D pada floating-type breakwater. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(1), 25–34. <https://journal.ipb.ac.id/jurnalikt/article/view/16912/14627>
- Al-Sairafi, F. A., Zhang, J., Jiang, C., Almansour, A. I., & Saleh, B. (2024). Enhancing hydrodynamic performance of floating breakwaters using wing plates. *Water*, 16(13), 1779. <https://doi.org/10.3390/w16131779>
- Angelina, C., & Winata, T. (2021). Ekosistem kehidupan yang berkelanjutan dengan sistem apung. *Jurnal STUPA*, 3(2), 1749–1760. <https://doi.org/10.24912/stupa.v3i2.12395>
- Armono, H., Supriadi, H., Sujantoko, S., Sholihin, & Suastika, K. (2012). Pemanfaatan floating breakwater high density polyethylene untuk budidaya rumput laut. *Monograf*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Arrizal, I. (2025). Pembangunan proyek breakwater Watu Ulo Jember diduga terjadi penyimpangan pelaksanaan. *Cakrawala.co*. <https://www.cakrawala.co/daerah/77514773364/pembangunan-proyek-breakwater-watu-ulo-jember-diduga-terjadi-penyimpangan-pelaksanaan>
- Dai, J., Wang, C. M., Utsunomiya, T., & Duan, W. (2018). Review of recent research and developments on floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 158, 132–151. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.083>

- Iskandar, M. I. (2015). Motion responses of the H-type floating breakwater subjected to regular wave (Undergraduate thesis). *Universiti Teknologi PETRONAS*. <https://utpedia.utp.edu.my/id/eprint/16368/>
- Jade, R. M. R., Perbani, N. M. R. R. C., & Handiani, D. N. (2017). Analisis efektivitas bangunan pelindung Pelabuhan Patimban dan pantai sekitar melalui tinjauan hidro-oseanografi. *Reka Geomatika*, 2017(2), 102–112. <https://doi.org/10.26760/jrg.v2017i2.1769>
- Kropf Marine. (n.d.). Floating breakwaters. https://kropfindustrial.com/marine_cat/floating-breakwaters/
- Losada, I. J., Silva, R., & Losada, M. A. (1996). Interaction of non-breaking directional random waves with submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 28(1–4), 249–266. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(96\)00020-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(96)00020-8)
- McCartney, B. L. (1985). Floating breakwater design. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111(2), 304–318. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:2\(304\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(304))
- Mulyono, T., & Ladesi, V. K. (2021). Pemeliharaan dan perawatan bangunan pantai di Muaragembong sebagai upaya menjaga lingkungan berkelanjutan. *Jurnal Abditek: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat Fakultas Teknik*, 1(1), 44–59. <https://doi.org/10.21009/ABDITEK.011.05>
- Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC). (1994). *Floating breakwaters: A practical guide for design and construction* (Report No. 85). MarCom Working Group 13. <https://www.pianc.org/publication/floating-breakwaters-a-practical-guide-for-design-and-construction/>
- PPID Jember. (2024). Camat Ambulu hadir acara edukasi siaga bencana dan konservasi di pesisir Pantai Watu Ulo. *Pemerintah Kabupaten Jember*. <https://ppid.jemberkab.go.id/berita-ppid/detail/camat-ambulu-hadiri-acara-edukasi-siaga-bencana-dan-konservasi-di-pesisir-pantai-watu-ulo>
- Samuel, S. P., Gayathri, R., Koley, S., & others. (2025). Motion responses with hydrodynamic factors in designing a floating breakwater and wave energy converter: A review. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 11, 233–263. <https://doi.org/10.1007/s40722-024-00372-8>
- Seabrook, S. R., & Hall, K. R. (1999). Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters. In *Coastal Engineering 1998: Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering* (pp. 2000–2013). ASCE. <https://doi.org/10.1061/9780784404119.150>
- Shen, Y., Pan, J., Zhou, Y., & Wang, X. (2022). Experimental study on wave attenuation performance of a new type of floating breakwater with twin pontoons and multi porous vertical plates. *China Ocean Engineering*, 36, 384–394. <https://doi.org/10.1007/s13344-022-0034-7>
- Sujantoko, Wardhana, W., Djatmiko, E. B., Armono, H. D., Putro, W. S., & Haryono, R. (2021). Studi karakteristik gelombang pada floating breakwater tipe terpancang dan tambat. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 12(1), 39–52. <https://doi.org/10.32679/jth.v12i1.650>
- Susanto, A., Pranowo, W. S., & Prasita, V. D. (2024). Karakter gelombang laut di Teluk Love Watu Ulo Kabupaten Jember saat Musim Peralihan I Tahun 2023: Character of ocean waves in Love Coastal Bay Watu Ulo Jember District during Transitional Season I in

2023. *Jurnal Hidropilar*, 10(1), 17–24. <https://jurnal.sttalhidros.ac.id/index.php/hidropilar/article/view/330/258>
- Tarore, B. W., Dundu, A. K. T., & Jasin, M. I. (2024). Evaluasi kinerja bangunan pengaman pantai di kawasan Bahu Mall Kota Manado. *Tekno*, 22(87), 567–578. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/tekno/article/view/54755/45936>
- Teh, H. M., Azizan, M. S. M., Kurian, V. J., & Hashim, A. M. (2025). Use of a floating breakwater system as an environmentally friendly method of coastal shelter. *Civil Engineering Department, Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia*. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CC15/CC15026FU1.pdf>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2002). *Coastal engineering manual* (EM 1110-2-1100). U.S. Army Corps of Engineers. <https://www.resolutionmineeis.us/sites/default/files/references/usace-2002.pdf>
- Wang, C. M., & Nguyen, H. P. (2023). Floating breakwaters: Sustainable solution for creating sheltered sea space. In J. N. Reddy, C. M. Wang, V. H. Luong, & A. T. Le (Eds.), *ICSCEA 2021. Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 268, pp. 3–20). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3303-5_1
- Wiegel, R. L. (1960). A floating breakwater. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 86(WW2), 1–35.
- Wu, S.-X., Sun, P.-N., Zhou, M.-L., Liu, N.-N., Peng, Y.-X., Xie, C.-M., & Ni, X.-Y. (2024). Experimental study on a new floating breakwater with openings, arc-shaped wings, and plates. *Physics of Fluids*, 36(7), 077166. <https://doi.org/10.1063/5.0214969>